

الطرق على أبواب السماء

كيف تنير الفيزياء والتفكير العلمي الكون والعالم المعاصر

الطرق على أبواب السماء

الطرق على أبواب السماء

كيف تنير الفيزياء والتفكير العلمي الكون والعالم المعاصر

تأليف
ليزا راندل

ترجمة
أميرة علي عبد الصادق

مراجعة
محمد فتحي خضر



الطرق على أبواب السماء

Knocking on Heaven's Door

ليزا راندل

Lisa Randall

الطبعة الأولى ٢٠١٥م
رقم إيداع ٧٣٠٠ / ٢٠١٤
جميع الحقوق محفوظة للناشر مؤسسة هنداوي للتعليم والثقافة
المشهرة برقم ٨٨٦٢ بتاريخ ٢٦ / ٨ / ٢٠١٢

مؤسسة هنداوي للتعليم والثقافة
إن مؤسسة هنداوي للتعليم والثقافة غير مسئولة عن آراء المؤلف وأفكاره
وإنما يعبِّر الكتاب عن آراء مؤلفه
٥٤ عمارات الفتح، حي السفارات، مدينة نصر ١١٤٧١، القاهرة
جمهورية مصر العربية
تليفون: ٢٠٢ ٢٢٧٠٦٣٥٢ + **فاكس:** ٢٠٢ ٣٥٣٦٥٨٥٣ +
البريد الإلكتروني: hindawi@hindawi.org
الموقع الإلكتروني: http://www.hindawi.org

راندل، ليزا.
الطرق على أبواب السماء: كيف تنير الفيزياء والتفكير العلمي الكون والعالم المعاصر/تأليف ليزا راندل.
تدمك: ٩٧٨ ٩٧٧ ٧١٩ ٧٧٤ ٨

١–الفيزياء

أ–العنوان

تصميم الغلاف: خالد المليجي.

المحتويات

من أفضل ما قيل عن الكتاب

أَلَّفت ليزا راندل هذا الكتاب بنفس الأسلوب الرشيق الذي تشرح به الفيزياء، جاعلةً الأفكار المعقدة مثيرة للاهتمام وسهلة الفهم. يستعرض كتابها أحدث التطورات في علم الفيزياء ويصحبنا في رحلات متعددة داخل نطاق الثقافة والسياسات العامة، ويشْرح العلم بطرق تجعلك تفكر على نحو مختلف، وتشجعك على اتخاذ قرارات أذكى تمسُّ العالم بأَسْرِه.

الرئيس بيل كلينتون

لم أكن أظن أنه من الممكن تأليف كتاب معقَّد ومفصَّل عن عالم الفيزياء يستطيع القارئ العادي استيعابه، لكن جاءت ليزا راندل وأَلَّفتْ هذا الكتاب الرائع الجذاب المليء بالأفكار البارعة وأثبتتْ لي كم كنت مخطئًا.

كارلتون كيوس، المنتج الحائز على جوائز وأحد مؤلفي مسلسل «الضياع»

أمام العلم معركتان عليه أن يخوضهما؛ معركة قلوب ومعركة عقول. إنهما معركتان تَجريان على جبهتين؛ معركة ضد الخرافات والجهل من جانب، ومعركة ضد مقاومة التقدم المتَّشحة برداء فكري زائف من جانب آخر. وكم هو رائع أن تكون ليزا راندل بما تملكه من علم متقدم ووضوح وجاذبية إلى جانبنا!

ريتشارد دوكينز، مؤلف كتابَي «الجين الأناني» و«وهم الإله»

شرْح عميق ورائع للغاية لطبيعة العلم، بل ولطبيعة الكون المعروف بأسره.

دانيال جيلبرت، مؤلف كتاب «التعثر في السعادة»

إن تركيز ليزا راندل على العلاقة الجوهرية بين التكنولوجيا والتفكير العلمي يثير مناقشات رائعة، وهذا الكتاب مقدمة أساسية عظيمة لغير العلماء الذين يحاولون تفهُّم الغرض من بناء مصادم الهادرونات الكبير.

إيلون ماسك، الرئيس التنفيذي ومدير قسم التكنولوجيا لمؤسسة سبيس إكس، والرئيس التنفيذي لمؤسسة تيسلا موتورز، والشريك المؤسس لموقع باي بال

الكثير من الكتب تستدعي إلى الأذهان صفات التفضيل المطلقة، غير أن هذا الكتاب يملك هذه الصفات جميعها. فهو يشرح أعظم مغامرة علمية في تاريخ البشر؛ مغامرة تستكشف أول ظواهر الكون وأكبرها وأصغرها وأقواها؛ مغامرة قد تجيب عن أعمق الأسئلة بشأن طبيعة الواقع المادي. إن شروحات ليزا راندل الشديدة الوضوح للمفاهيم الموجودة عند تخوم علم الفيزياء — بما في ذلك أفكارها المبهرة — مفيدة للغاية، ودفاعها المُخْلص عن العقل والعلم لهو إسهام مرحَّب به في عالم الأفكار المعاصر. اقرأ هذا الكتاب اليوم كي تَفْهم علوم الغد.

ستيفن بينكر، مؤلف كتابي «كيف يعمل العقل» و«مادة الفكر»

ليزا راندل امرأة نادرة بحق، فهي عبقرية في الفيزياء النظرية تستطيع أن تكتب وتتحدث إلى غير المتخصصين منا بطرق نفهمها ونستمتع بها. وهذا الكتاب يأخذ غير المتخصصين إلى أقرب ما يمكنهم أن يصلوا إليه من آليات العمل الداخلية للكون.

لورَنس إتش سَمرز، وزير الخزانة السابق

تشرح ليزا راندل بكل كفاءة لغير الفيزيائيين المناهج العلمية الأساسية للفيزياء الحديثة وما قد تكشف عنه أحدث التجارب. إنه كتاب لا غنى عن قراءته من أجل تقديرِ ما سيجلبه لنا المستقبل.

جون كريج فينتر، مشارك في تخطيط الجينوم البشري

مقدمة

تحيا البشرية الآن على أعتاب عصر الاكتشافات؛ فأعظم تجارب فيزياء الجسيمات وعلم الكونيات وأكثرها إثارةً تمضي قُدُمًا، في حين ينصبُّ تركيز العديد من أبرز العلماء الموهوبين في مجالي الفيزياء والفلك على ما تُفضِي إليه هذه التجارب من نتائج. وما سيتوصل إليه العلماء في العقد التالي قد يقدِّم أدلةً ستغيِّر في النهاية من نظرتنا للتركيب الأساسي للمادة، بل للفضاء ذاته، وقد تمنحنا هذه الأدلة كذلك صورةً أكثر شمولًا لطبيعة الواقع. ومَن يُولِي هذه التطورات اهتمامًا لا يتوقَّع أن تكون مجرد إضافات لعصر ما بعد الحداثة فحسب، وإنما ما نطمح إليه هو التوصُّل إلى اكتشافات يمكن أن تقدِّم نموذجًا فكريًّا خاصًّا بالقرن الحادي والعشرين، مختلفًا على نحو جذري بشأن بِنْية الكون الأساسية، ومن شأن ما يمنحه لنا هذا النموذج من معارف أن يغيِّر الصورة المحفورة في مخيلتنا عن التركيب الأساسي للكون.

شهد يوم العاشر من سبتمبر عام ٢٠٠٨ حدثًا تاريخيًّا؛ ألا وهو التشغيل التجريبي الأول لمُصادِم الهادرونات الكبير، ورغم بساطة هذا الاسم وافتقاره لعنصر الإلهام، فإن ذلك لا ينطبق على الإنجازات المتوقَّع منه تحقيقها، والتي من المُنتظَر أن تكون فريدةً من نوعها. يشير وصف «الكبير» هنا إلى المُصادِم لا إلى الهادرونات؛ إذ يحتوي على نفق حلقي ضخم يبلغ طوله ٢٦٫٦ كيلومترًا،[1] ويمتد إلى عمق كبير تحت الأرض ما بين جبال جورا وبحيرة جنيف، مارًّا بالحدود الفرنسية السويسرية. وتعمل المجالات الكهربائية داخل هذا النفق على تعجيل حزمتَيْ جسيمات تتكوَّن كلٌّ منهما من مليارات البروتونات (التي تنتمي إلى فئة من الجسيمات تُسمَّى الهادرونات؛ ومن هنا جاء اسم المُصادِم)، بحيث تدوران داخل النفق الحلقي بمعدل ١١ ألف دورة في الثانية الواحدة تقريبًا.

ويضم المُصادِم ما يُعَدُّ — من نواحٍ عِدَّة — أعظمَ التجارب وأكثرها إذهالًا على الإطلاق. والهدف منه هو إجراء دراسات مُفصَّلة لبنية المادة عند مسافاتٍ لم يسبق قياسها قطُّ، وطاقاتٍ أعلى من أي طاقات سبق استكشافها من قبلُ. هذه الطاقات من المفترَض أن تُنتِجَ مجموعةً من الجسيمات الأساسية العجيبة، وتكشف عن تفاعلات حدثت في وقت مبكر من نشوء الكون، بعد وقوع الانفجار العظيم بنحو جزء من التريليون من الثانية.

وصل تصميم هذا المُصادِم بالابتكار والتكنولوجيا إلى أقصى حدٍّ لهما، وفرَضَ تشييدُه قدرًا أكبر من العقبات. لكن بعد تسعة أيام فقط من بدء تشغيل المُصادِم المُبشِّر بالنجاح، تسبَّبت وصلة لحام خاطئة في وقوع انفجار به؛ ما أصاب الفيزيائيين وغيرهم من المهتمِّين بالتوصُّل لفهم أفضل للطبيعة بالإحباط. لكن عندما عاد المُصادِم للعمل في خريف ٢٠٠٩ — وعمل على نحوٍ أفضل من أي توقعات — غَدَا ما بُشِّرنا به على مدى ربع قرن من الزمان واقعًا ملموسًا أمام أعيننا.

وفي ربيع العام ذاته، أُطلِق القمران الصناعيان «بلانك» و«هيرشل» من جويانا الفرنسية. كنت قد علمت بموعد هذا الحدث من مجموعة من روَّاد الفضاء المتحمسين الذين يعملون في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا (كالتيك). كان أولئك الروَّاد قد التَقَوا في الساعة الخامسة والنصف صباحَ يوم ١٣ مايو في باسادينا — التي كنتُ أزورها حينها — ليشهدوا ذلك الحدث التاريخي عن بُعْدٍ. كان من المنتظر أن يقدِّم القمرُ الصناعي هيرشل معلوماتٍ دقيقةً عن تكوُّن الأقمار، في حين يقدِّم القمرُ بلانك تفاصيلَ حول الإشعاع المتخلِّف عن الانفجار العظيم؛ الأمر الذي سيؤدِّي بدوره إلى التوصُّل لمعلومات جديدة حول التاريخ المبكر للكَوْن الذي نعيش فيه. عادةً يكون هذا النوع من عمليات الإطلاق مثيرًا، لكنه مسبِّب للتوتر في الوقت ذاته؛ إذ تبوء اثنتان من بين كلِّ خمس عملياتِ إطلاقٍ بالفشل، لتَضِيع معها هباءً سنواتٌ من العمل على المَعَدَّات العلمية المُخصَّصة التي تشتمل عليها هذه الأقمار الصناعية التي تسقط عائدةً إلى الأرض. لكن، لحسن الحظ، تُوِّجت عمليةُ إطلاق القمرين بالنجاح، وأخذت المعلومات الواردة من القمرين تتوالى، شاهِدةً على مدى نجاح عملية الإطلاق. لكننا مضطرون للانتظار عِدَّة أعوام قبل أن يقدِّم لنا هذان القمران أهمَّ ما يمكنهما تقديمه من بيانات حول الأقمار والكَوْن.

تقدِّم الفيزياء الآن جوهرًا معرفيًّا موثوقًا حول كيفية عمل الكَوْن على نطاق مسافات وطاقات هائلة. وقد أَسبغَتِ الدراساتُ النظرية والتجريبية على العلماء فهمًا عميقًا بشأن العناصر والبِنى، بدءًا من تلك البالغة الصغر وصولًا إلى الضخمة منها. وتوصَّلنا بمرور الوقت إلى تصوُّرٍ شاملٍ ومُفصَّل لكيفية اتساق هذه الأجزاء معًا. كما نجحت النظريات في أن تصف كيفية تطوُّر الكَوْن من مُقوِّمات ضئيلة الحجم تشكَّلت منها الذرَّات، تلك الذرات التي الْتَحمت بدورها مكوِّنةً النجوم التي تشتمل عليها المجرَّات والبنى الأكبر حجمًا المنتشرة في أرجاء الكَوْن؛ وكيف تفجَّرت بعد ذلك بعضُ النجوم وشكَّلت عناصرَ ثقيلة دخلت في مجرَّتنا ونظامنا الشمسي، وهي العناصر التي تلعب دورًا غايةً في الأهمية في نشأة الحياة. وباستخدام النتائج الآتية من مُصادِم الهادرونات الكبير وما تكْشف عنه الأقمار الصناعية كتلك التي ذكرناها فيما سبق، يطمح الفيزيائيون الآن في البناء على هذه القاعدة الشاملة ذات الأساس المتين من أجل توسيع نطاق فهمهم، بحيث يشمل المسافات الأصغر والطاقات الأكبر، ويصل إلى قَدْرٍ من الدقة لم يتوصَّل إليه أحدٌ من قبلُ قطُّ. إنها مغامرة حقيقية، وغاياتنا فيها بعيدة المدى.

لعلك سمعتَ من قبلُ تعريفاتٍ واضحةً للغاية ودقيقةً من الناحية الظاهرية للعلم، خاصةً عند مقارنته بنُظُم المعتقدات، مثل الدين. لكن القصة الحقيقية لتطوُّر العلم معقَّدَة، ورغم أننا نفضِّل التفكير في العلم — على الأقل هذا ما فعلتُه عند بداية عملي به — باعتباره انعكاسًا موثوقًا به للعالم الخارجي والقواعد التي تحكم العالم المادي، فإن الأبحاث الفعلية تُجرَى على نحوٍ شبه محتوم في إطار من الإبهام نطمح من خلاله في تحقيق التقدُّم، لكن حيث لا نتمتع بيقين حقيقي. والتحدي الذي يواجِهه العلماء هو المثابرة في العمل على أفكار واعدة، مع التشكُّك فيها طوال الوقت بهدف التحقُّق من صِدْقها وتبعاتها. فالبحث العلمي ينطوي حتمًا على محاولة الحفاظ على التوازن بين الأفكار الصعبة والمتناقضة والمتنافسة أحيانًا، لكن المثيرة غالبًا. والهدف من ذلك هو توسيع حدود المعرفة. لكن عند التعامل مع البيانات والمفاهيم والمعادلات للمرة الأولى، قد يساوِر الجميعَ عدمُ اليقين بشأن التفسير الصحيح لها، بما في ذلك أكثر المشاركين انخراطًا في هذا العمل.

ينصبُّ تركيزي فيما أُجرِيه من أبحاث على نظرية الجسيمات الأولية (دراسة أصغر أجسام توصَّلتْ إليها المعرفة البشرية)، مع الانتقال من حين لآخَر إلى نظرية الأوتار وعلم الكونيَّات (دراسة أكبر الأجسام حجمًا). فأسعى أنا وزملائي لفهم ما يوجد في قلب المادة،

وما يوجد في الكَوْن، وكيف ترتبط في النهاية جميع الخصائص والكميات الأساسية التي يكتشفها الفيزيائيون التجريبيون معًا. لا يُجرِي الفيزيائيون النظريون أمثالي التجاربَ الفعليةَ التي تحدِّد أي النظريات تنطبق على العالم الواقعي، وإنما نحاول التنبُّؤَ بالنتائج التي من الممكن أن تتوصَّل إليها مثل هذه التجارب، والمساعدةَ في تطوير أساليب مُبتكَرَة للتحقُّق من صحة الأفكار. وليس من المرجح أن تغيِّر الأسئلة التي نحاول الإجابة عنها ما يتناوله الناس من طعام على العشاء يوميًّا في المستقبل القريب، لكن هذه الدراسات من شأنها مَنْحُنا المعرفة في النهاية بشأن مَن نحن ومِن أين أتينا.

يتناول «الطرق على أبواب السماء» الأبحاث التي نجريها، وأهم الأسئلة العلمية التي تواجهنا. فالتطورات الحديثة في فيزياء الجسيمات وعلم الكونيات تملك القدرة على أن تغيِّر جذريًّا فهمنا للعالم؛ من حيث بِنْيَته وتطوُّره والقوة الأساسية التي تحرِّكه. يصف هذا الكتاب الأبحاثَ التجريبية القائمة في مُصادِم الهادرونات الكبير، والدراسات النظرية التي تسعى للتنبؤ بما ستتمخض عنه تلك التجارب. كما أنه يصف الأبحاثَ القائمةَ في علم الكونيات، والكيفية التي نحاول بها استنتاج طبيعة الكون، وتحديدًا طبيعة المادة المظلمة الخفية الموجودة في كل مكان بالكون.

بَيْدَ أن «الطرق على أبواب السماء» له نطاق أوسع أيضًا؛ إذ يستكشف أسئلةً أكثر شمولية تتصل بجميع الأبحاث العلمية. وإلى جانب وصف حدود الأبحاث الحالية، يدور الموضوع الأساسي لهذا الكتاب حول توضيح طبيعة العلم أيضًا؛ فهو يصف كيفيةَ اتخاذنا القرارات بشأن الأسئلة التي علينا طَرْحها، وأسبابَ اختلافِ العلماء حول ذلك دومًا، وكيفيةَ انتشار الأفكار العلمية الصحيحة في النهاية. ويستعرض الكتاب أيضًا الأساليبَ التي يتقدَّم بها العلمُ بالفعل، والجوانبَ التي يتناقض فيها مع الأساليبِ الأخرى للبحث عن الحقيقة، مع طَرْح بعض الأُسُس الفلسفية التي يقوم عليها العلم، ووصف المراحل الوسيطة التي لا يكون مؤكدًا فيها إلى أين سينتهي بنا المآل، ومَن الذي على حقٍّ. وعلى القدر نفسه من الأهمية، يعرض الكتاب كيف يمكن تطبيق الأساليب والأفكار العلمية خارج نطاق العلم، ما يشجِّع بدوره على المزيد من عمليات صُنْع القرار العقلانية في سياقات أخرى أيضًا.

يستهدف هذا الكتاب القارئ غير المتخصص المهتم بما يطرحه من موضوعات، ويرغب في تعزيز فهمه للفيزياء النظرية والتجريبية الحالية، ويطمح في إدراكٍ أفضل لطبيعة العلم المعاصر ومبادئ التفكير العلمي السليمة. غالبًا لا يستوعب الناسُ حقًّا كُنْهَ

العلمِ وما يمكن توقُّعه منه. والكتاب الذي بين يديك هو محاولة مني لتصحيح بعض المفاهيم الخاطئة، وربما التنفيس قليلًا عن إحباطي بشأن كيفية فهم العلم وتطبيقه في الوقت الحالي.

لقد منحَتْني السنوات القليلة الماضية بعض الخبرات الفريدة، وأتاحت لي فرصةَ إجراءِ محادثاتٍ تعلَّمْتُ منها الكثير. وأودُّ مشاركة هذه الأمور هنا لتكون بمنزلة نقاط انطلاقٍ لاستكشاف بعض الأفكار المهمة. ورغم أنني لستُ متخصِّصةً في جميع المجالات التي أتناولها في هذا الكتاب — ورغم عدم اتساع المجال هنا لإيفائها جميعًا حقَّهَا — فإنني أطمح في أن يدفع هذا الكتاب بالقُرَّاء نحو سُبُل أكثر جدوى، مع توضيحه بعض التطورات الحديثة المثيرة أثناء ذلك. من المفترض كذلك أن يساعد الكتاب القُرَّاء في معرفة المصادر الأكثر موثوقيةً للمعلومات العلمية — ومصادر المعلومات الخاطئة — عند البحث عن المزيد من الأجوبة في المستقبل. قد تبدو بعض الأفكار التي يعرضها هذا الكتاب أولية للغاية، لكن الفهم الأشمل للأساس المنطقي للعلم الحديث سيساعد في تمهيد سبيل أفضل للبحث والمسائل المهمة التي يواجهها العالم المعاصر حاليًّا.

وفي ظل ما نعيشه من عصر الأفلام السينمائية المستندة إلى أحداث أجزاء سابقة لها، يمكن اعتبار هذا الكتاب القصة الأصلية لكتابي السابق له الذي يحمل عنوان «الطرق الملتوية»، مع تحديث يوضِّح الحال الذي نحن عليه الآن وتكهناتنا الحالية؛ فهو يسد الفجوات بتناوله أُسُس العلم التي تقوم عليها الأفكار والاكتشافات الحديثة، ويفسِّر سببَ ترقُّبنا ظهور بيانات جديدة.

يتنقَّل الكتاب بين تفاصيل العلم الذي يجري الآن من جانب، والأفكار المتعلقة بالمبادئ والموضوعات التي يقوم عليها هذا العلم وتُعَدُّ جزءًا لا يتجزَّأ منه، لكنها مفيدة في الوقت نفسه في فهم العالم الأوسع نطاقًا، من جانب آخَر. فيتناول كلٌّ من الجزء الأول من الكتاب، والفصلين الحادي عشر والثاني عشر في الجزء الثاني، والفصلين الخامس عشر والثامن عشر في الجزء الثالث، والجزء الأخير (كلمة أخيرة)؛ موضوعَ التفكيرِ العلمي، في حين ينصبُّ التركيز في الفصول المتبقية من الكتاب على الفيزياء؛ فتوضِّح موضعنا الحالي في هذا العلم الآن، وكيفية وصولنا إلى هذه المرحلة. فهو من نواحٍ عِدَّة كتابان في كتاب واحد، لكنهما كتابان يُفضَّل قراءتهما معًا. لعل الفيزياء الحديثة تبدو في نظر البعض بعيدةً كليةً عن حياتنا اليومية، فلا تمُتُّ لها بصلة ولا يمكن فهمها بسهولة أيضًا، لكن

إدراك الأُسُس الفلسفية والمنهجية التي توجِّه تفكيرنا من شأنه إيضاح كلٍّ من العلم ووثاقة صلة التفكير العلمي بحياتنا، وهذا ما سنراه في العديد من الأمثلة التي سنطرحها. وعلى العكس من ذلك، لا يمكن الوصول إلى فهم كامل للعناصر الأساسية للتفكير العلمي إلا من خلال ممارسة العلم فعليًّا لإثبات الأفكار. ومَن يميل مِن القرَّاء لهذا الجانب أو ذاك قد يتجاوز جزءًا أو آخَر في هذا الكتاب، أو يمر عليه مرور الكرام، بَيْدَ أن التركيز على كلا الجانبين اللذين يتناولهما الكتاب يمنح القارئَ معرفةً متوازِنةً.

من المفاهيم المتكررة على مدار الكتاب مفهوم النطاق. وتقدِّم قوانين الفيزياء إطارًا متَّسِقًا للكيفية التي تتناغَمَ بها الأوصاف النظرية والمادية الثابتة لتشكِّل كيانًا متماسكًا، بدءًا من الأطوال المتناهية الصِّغَر التي تُكتشَف حاليًّا في مصادم الهادرونات الكبير، وصولًا إلى الحجم الهائل للنظام الكوني برمته.[2] ويلعب مبدأ النطاق دورًا مهمًّا في تفكيرنا، وكذلك في المبادئ والأفكار التي سنواجهها. تنطبق النظريات العلمية المُثبَتة على نطاقاتٍ يسهل بلوغها، غير أننا عندما نضيف إليها المعرفة التي اكتسبناها حديثًا من مسافات لم يسبق لنا اكتشافها من قبلُ — صغيرة كانت أم كبيرة — تصير هذه النظريات جزءًا من نظريات أخرى أكثر دقة وجوهرية. ويركز الفصل الأول من الكتاب على تعريف عنصر النطاق، موضِّحًا كيف أن التصنيف حسب الطول أمر ضروري للفيزياء وللكيفية التي تُبنى من خلالها التطورات العلمية الحديثة على التطورات السابقة لها.

يستعرض كذلك الجزء الأول من الكتاب الأساليب المختلفة لتناول المعرفة، ويوضِّح أوْجُه الاختلاف بينها. فإذا سألت الناس عن فكرتهم عن العلم، فستحصل على إجابات متباينة بقدر تبايُن مَن طرحْتَ عليهم السؤال؛ إذ سيصِرُّ البعض على وصف العالم المادي بعبارات ثابتة جامدة، في حين سيعرِّفه آخرون بأنه مجموعة من المبادئ التي تخضع لتغيير دائم، وسيجيب فريقٌ آخَر بأن العلم ليس سوى نظام معتقدي آخَر، لا يختلف نوعيًّا عن الفلسفة أو الدين. والحقيقة أن كل هذه الإجابات خاطئة.

وطبيعة العلم المتجددة على الدوام هي السبب الرئيسي وراء وجود مثل هذا القدر الهائل من الجدل، الذي لا يُستثنَى منه المجتمع العلمي ذاته. ويعرض هذا الجزء جانبًا من التاريخ الذي يعكس كيف تعود جذورُ الأبحاث الحالية إلى التطورات الفكرية التي ظهرت في القرن السابع عشر، ويواصِل عرضَ عددٍ من مظاهر الجدل الأقل وضوحًا بين العلم والدين، وهي المواجهة التي نشأت بعض جوانبها آنذاك. ويتناول الجزء، فضلًا عن ذلك، النظرةَ المادية للمادة والتبعات الشائكة لهذه النظرة على مسألة الصراع بين العلم

والدين، بالإضافة إلى قضية مَن يجدر بهم الإجابة عن الأسئلة الجوهرية في حياتنا، وكيف يفعلون ذلك.

أما الجزء الثاني من الكتاب، فينتقل بالقارئ إلى التكوين الفيزيائي للعالم المادي، ويمهِّد السبيلَ للرحلة العلمية التي سيأخذك فيها بعد ذلك مستكشِفًا المادة، بدءًا من النطاقات المألوفة وصولًا إلى النطاقات بالغة الصِّغَر، مع اتباع أسلوب التقسيم دومًا حسب النطاق. وهذا السبيل سيأخذنا من أراضٍ نَأْلفها إلى أحجام دون المجهرية لا يمكن لشيء استكشاف بِنْيَتها الداخلية سوى معجِّلات الجسيمات الضخمة. وينتهي الجزء بتقديم بعض التجارب المهمة التي تُجرَى الآن — مثل مصادم الهادرونات الكبير، والمسبارات الفلكية التي تستكشِف المراحلَ المبكرة من الكَوْن — والتي من المفترض أن تصل بفهمنا إلى آفاقٍ غير مسبوقة.

هذه المشروعات الجريئة والطموحة — شأنها شأن أي تطوُّر مشوق — تملك القدرة على تغيير نظرتنا العلمية الشاملة تغييرًا جذريًّا. وفي الجزء الثالث من الكتاب، سنبدأ في التعمُّق أكثر في تناول عمليات مصادِم الهادرونات الكبير، واستكشاف كيف تُنتِج هذه الماكينة حُزَمَ البروتونات، وتحقق التصادم بينها لإنتاج جسيمات جديدة من شأنها تزويدنا بمعلومات عن أصغر النطاقات التي يمكن الوصول إليها. ويستعرض هذا القسم كذلك الكيفيةَ التي يفسِّر الفيزيائيون التجريبيون بها ما يتوصَّلون إليه من نتائج.

وقد ساهمت المنظمة الأوروبية للأبحاث النووية المعروفة بالاختصار «سيرن» (والفيلم السينمائي الأمريكي الشهير شديد التضليل «ملائكة وشياطين») في الترويج للجانب التجريبي لفيزياء الجسيمات؛ فصار الكثيرون على عِلم بمعجِّل الجسيمات الضخم الذي سيصادم بين البروتونات عالية الطاقة، لتتركَّزَ بعد ذلك هذه البروتونات في مساحة بالغة الصغر بهدف إنشاء صور من المادة لم تسبق رؤيتها من قبلُ. ومصادم الهادرونات الكبير قَيْد التشغيل الآن، وهو يهدف لتغيير نظرتنا للطبيعة الجوهرية للمادة، بل للفضاء ذاته، لكننا لا نعلم إلى الآن ما سيتوصل إليه بالفعل.

هذا وفي أثناء رحلتنا العلمية، سوف نتناول فكرةَ عدمِ اليقين العلمي، وما يمكن للقياسات إخبارنا به حقًّا. فالبحث بطبيعته يقع على حدود معرفتنا الفعلية، ويهدف كلٌّ من الحساب والتجربة إلى الحد من أكبر عدد ممكن من صور عدم اليقين أو القضاء عليها تمامًا، وتحديد ما يتبقَّى منها على وجه الدقة. رغم ذلك، فمن الناحية العملية، تحفل الممارسة اليومية للعلم بصور عدم اليقين، وهو ما يبدو أمرًا شديدَ التناقُض. ويستكشف

الجزء الثالث من الكتاب كيف يتعامل العلماء مع التحديات المتأصلة في استكشافاتهم الصعبة، وكيف يمكن للجميع الاستفادة من التفكير العلمي عند تفسير البيانات التي تصدر في عالم متزايد التعقيد، وفهم هذه البيانات.

يتناول الجزء الثالث أيضًا الثقوبَ السوداء في مصادم الهادرونات الكبير، وكيف أن المخاوف التي تصاعَدَتْ بشأنها تتناقض مع بعض المخاطر الحقيقية التي نواجِهها حاليًّا. وسوف نستعرض كذلك القضايا المهمة لتحليل التكاليف والفوائد والمخاطر، وكيف يمكن للناس التفكير في هذه القضايا على نحوٍ أفضل، سواء داخل المختبرات أو خارجها.

أما الجزء الرابع، فيصف الأبحاث التي تُجرَى على جسيم «بوزون هيجز» ونماذجه المحددة التي تمثِّل افتراضات مدروسة لما هو موجود بالفعل، كما تمثِّل أهدافًا لأبحاث مصادم الهادرونات الكبير. وإذا أكَّدَتْ تجاربُ هذا المصادم صحةَ بعض الأفكار التي اقترحها الفيزيائيون النظريون — أو حتى إذا كشفت عن أشياء لم يسبق توقُّعها — فإن النتائج سوف تغيِّر من أسلوب تفكيرنا في العالم. يشرح هذا القسم آلية هيجز المسئولة عن كتل الجسيمات الأولية، بالإضافة إلى مشكلة التسلسل الهرمي التي تخبرنا بأنه علينا اكتشاف المزيد. يبحث هذا القسم أيضًا في النماذج التي تتناول هذه المشكلة والجسيمات الغريبة الجديدة التي تتنبَّأ بها، مثل الجسيمات المرتبطة بالتناظر الفائق أو الأبعاد الإضافية للفضاء.

بالإضافة إلى عرض فرضيات محدَّدَة، يشرح هذا الجزء كيف يبني الفيزيائيون النماذج، ومدى كفاءة المبادئ الإرشادية في هذا الشأن، مثل «استكشاف الحقيقة من الجمال» و«الأسلوب التنازلي» مقابل «الأسلوب التصاعدي». ويوضِّح ما يبحث عنه مصادم الهادرونات الكبير، وكيف يتنبَّأ الفيزيائيون بما يمكن أن يتوصَّل إليه هذا المصادم. ويستعرض القسم كذلك كيف سيحاول العلماء ربط البيانات المجردة ظاهريًّا التي سينتجها لنا المصادم ببعض الأفكار الأساسية العميقة التي ندرسها حاليًّا.

وبعد جولتنا في الأبحاث التي تتناول الجانب الداخلي للمادة، ننتقل برحلتنا إلى الخارج في الجزء الخامس. ففي الوقت نفسه الذي يسبر فيه مصادم الهادرونات الكبير غوْرَ أصغر نطاقات المادة، تستكشف الأقمار الصناعية والتليسكوبات أضخم النطاقات في النظام الكوني، وذلك بدراسة المعدل الذي يتسارع به تمدُّد هذه النطاقات. هذا فضلًا عن دراستها تفاصيل بقايا الإشعاع الناجم عن الانفجار العظيم. ويمكن لهذا العصر أن يشهد تطورات جديدة مذهلة في «علم الكونيَّات»؛ وهو العلم الذي يبحث في كيفية تطوُّر

الكَوْن. وفي هذا الجزء، سنستكشف الكَوْنَ إلى أقصى النطاقات، ونناقش العلاقة بين فيزياء الجسيمات وعلم الكونيَّات، بالإضافة إلى المادة المظلمة المُحيِّرة والأبحاث التجريبية عنها.

أما الكلمة الأخيرة في الجزء السادس، فتستعرض موضوع الإبداع، وعناصر التفكير المتنوعة والثرية التي تدخل في التفكير الإبداعي. وتستكشف كيف نحاول الإجابة عن الأسئلة الكبرى من خلال أنشطتنا اليومية التي تبدو أصغر بعض الشيء. ويُختَم الكتاب ببعض الأفكار النهائية حول السبب وراء الأهمية الكبيرة للعلم والتفكير العلمي في الوقت الحالي، بالإضافة إلى العلاقة التعاضدية بين التكنولوجيا والتفكير العلمي التي أدَّتْ إلى قدر كبير من التقدُّم في العالم المعاصر.

طالما أجد ما يذكِّرني بمدى صعوبة تقدير غير العلماء للأفكار التي يتناولها العلم المعاصر ويصعب تخيُّلها أحيانًا. وقد اتَّضَحَ لي ذلك التحدِّي عندما التقيت بطلاب أحد الفصول الدراسية الجامعية بعد إحدى المحاضرات العامة التي ألقيتُها عن الفيزياء والأبعاد الإضافية؛ فعندما أُبلِغت بأن جميع الطلاب لديهم سؤال واحد مُلِحٌّ يودون طرحه عليَّ، توقَّعتُ أن يكون الْتباسًا بشأن الأبعاد، لكنني عرفتُ بعد ذلك أنهم كانوا متلهفين لمعرفة كم أبلُغ من العمر! لكن عدم الاهتمام ليس هو التحدي الوحيد؛ والحقيقة أن الطلاب بدءوا بالفعل في الاهتمام بالأفكار العلمية. لكن ما لا يمكن إنكاره هو أن العلم الأساسي يكون مجرَّدًا في أغلب الأحيان، وإثباته يمكن أن يكون صعبًا، وهذه هي العقبة التي اضطررتُ لمواجهتها في جلسة استماع الكونجرس حول أهمية العلم الأساسي، التي حضرتها في خريف عام ٢٠٠٩ مع دنيس كوفار مدير قسم فيزياء الطاقة العالية في وزارة الطاقة الأمريكية، وبيير أدون مدير مختبر معجِّل فيرمي الوطني، وهيو مونتجومري مدير مختبر جيفرسون، المنشأة الفيزيائية النووية. كانت تلك المرة الأولى لي في أروقة الحكومة منذ أن اصطحبني عضو الكونجرس بنجامين روزنثال في جولة بها، عند وصولي للدور النهائي في مسابقة وستنجهاوس للعلوم بالمدرسة الثانوية قبل ذلك الحين بسنوات عديدة. كان روزنثال كريمًا معي ومنحني ما هو أكثر من مجرد فرصة لالتقاط صورة معه كباقي المؤهلين الآخَرين للجولة النهائية.

وأثناء زيارتي الثانية للمكان، استمتعت مجدَّدًا بمشاهدة المكاتب التي تُصنَع داخلها السياسات. تقع الغرفة المخصَّصة للجنة مجلس النوَّاب للعلوم والتكنولوجيا في مبنى ريبرن التابع لمجلس النواب الأمريكي. جلس النوَّاب في أقصى الغرفة، في حين جلسنا نحن «الشهود» في مواجهتهم. وفوق رءوسهم، عُلِّقت لوحات تحمل عبارات ملهمة، أولها «بلا رؤية يجمح الشعب» (سفر الأمثال، ٢٩: ١٨).

يبدو أن الحكومة الأمريكية لا بد أن تشير إلى الكتاب المقدس حتى في غرفة تابعة للكونجرس مخصَّصة للعلم والتكنولوجيا. رغم ذلك، فإن المقولة تعبِّر عن فكرة دقيقة ونبيلة نودُّ جميعنا تطبيقها.

أما اللوحة الثانية، فتضمَّنت مقولةً أكثر علمانيةً لتينيسون؛ أَلَا وهي: «استبصرتُ المستقبل قدر الإمكان؛ فتجلت أمامي صورة العالم وما سيشهده من عجائب.»

كانت تلك أيضًا فكرةً جيدةً يمكن أخذها في الاعتبار عند وصف أهدافنا من الأبحاث.

المثير للسخرية أن تنظيم الغرفة جعلنا نحن «الشهود» المنتمين لعالَم العِلم — الذين يتعاطفون بالفعل مع هذه العبارات — في مواجهة تلك اللوحات التي وضعت مباشَرةً نصب أعيننا، في حين جلس النوَّاب أسفلها حيث لا يستطيعون رؤيتها. وقد أقرَّ عضو الكونجرس ليبنسكي — الذي قال في العبارات الافتتاحية للجلسة إن الاكتشافات تحث على طرح المزيد من التساؤلات والاستفسارات الميتافيزيقية المهمة — بأنه اعتاد ملاحظة تلك اللوحات، لكنه صار من اليسير الآن نسيانها تمامًا. وجاء على لسانه أيضًا: «قَلَّمَا ينظر أحدٌ منَّا إليها.» وعبَّر عن امتنانه لتذكيرنا له بها.

بعد الانتهاء من الحديث عن الديكور، انتقلنا نحن العلماء للمهمة التي كنَّا بصددها، موضحين ما يجعل من العصر الذي نعيشه عصرًا مثيرًا وغير مسبوق في مجال فيزياء الجسيمات وعلم الكونيَّات. ورغم أن أسئلة النوَّاب اتَّسمَتْ أحيانًا بالحدة والتشكُّك، فقد كان بوسعي تقدير ما يواجهونه دومًا من معارضة عند التوضيح لناخبيهم أسباب ضرورة عدم التوقف عن تمويل البحث العلمي، حتى في ظل ظروف عدم الاستقرار الاقتصادي. وقد تراوحت أسئلتهم ما بين تفاصيل أهداف تجارب محدَّدة وصولًا إلى قضايا أكثر اتِّسَاعًا تتعلق بدور العلم ووجهته.

وما بين فترات غياب النوَّاب، الذين اضطروا للرحيل واحدًا تلو الآخَر للإدلاء بأصواتهم، قدَّمنا بعض الأمثلة للفوائد الجانبية التي يمكن جَنْيها من تطوير العلم الأساسي. فحتى حينَ يُباشَر العلم من أجل العلم، كثيرًا ما يكون له العديد من الفوائد من نواحٍ أخرى؛ فتحدثنا عن تطوير تيم بيرنرز لي للشبكة العنكبوتية العالمية لتكون وسيلة تسمح للفيزيائيين في دول عديدة بالتعاون على نحو يسير في تجاربهم المشتركة في سيرن، وناقشنا كذلك التطبيقات الطبية، مثل التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني، وهو وسيلة لاستكشاف بنية الجسم الداخلية باستخدام الجسيمات المضادة للإلكترونات، وأوضحنا دور إنتاج المغناطيسات الفائقة التوصيل على المستوى الصناعي التي تم

تطويرها للمصادمات، لكنها صارت تُستخدَم الآن في التصوير بالرنين المغناطيسي أيضًا. وأشرنا، أخيرًا، إلى أنظمة تحديد المواقع العالمية التي نستخدمها يوميًّا في سياراتنا.

بطبيعة الحال ليس بالضرورة أن يكون للعلم الخالص أيَّة فائدة مباشِرة من الناحية العملية؛ فحتى إن كان هناك عائد نهائي، فإننا نادرًا ما نعرفه في وقت الاكتشاف. فعندما أدرك بنجامين فرانكلين أن البرق عبارة عن كهرباء، لم يكن يعلم آنذاك أن الكهرباء سرعان ما ستغيِّر وجه العالم، وعندما عمل أينشتاين على النسبية العامة، لم يتوقَّع أنها ستُستخدَم في أي أجهزة عملية.

ومن ثَمَّ، لم يكن التركيز الأساسي للقضية التي طرحناها في ذلك اليوم على تطبيقات محدَّدة، وإنما على الأهمية المحورية للعلم الخالص. ورغم أن وضع العلم في أمريكا قد يتَّسِم بعدم الاستقرار، فإن العديد من الناس يدرك قيمته الآن. لقد تغيَّرَتْ وجهة نظر المجتمع للكَوْن والزمان والمكان بفضل أينشتاين، وهذا ما تثبته الكلمات الأصلية لأغنية «مع مرور الوقت» التي ذكرتُها في كتابي «الطرق الملتوية».[3] إن لغتنا وأفكارنا تتغير بتطور فهمنا للعالم، وظهور أساليب تفكير جديدة. وما يدرسه العلماء حاليًّا، وردُّ فعلِنا تجاهه سيلعب دورًا محوريًّا في فهمنا للعالم وفي تشكيل مجتمع قوي وذي بصيرة.

إننا نعيش حاليًّا عصرًا مثيرًا على نحو استثنائي في الفيزياء وعلم الكونيَّات، وبعض الأبحاث التي تجري حاليًّا تُعَدُّ من أكثر الأبحاث تقدُّمًا على الإطلاق. ومن خلال مجموعة كبيرة من الاستكشافات، يستعرض هذا الكتاب الأساليب المختلفة التي نتبعها في فهم العالم — من خلال الفن والدين والعلم — لكن مع التركيز بشكل رئيسي على أهداف الفيزياء الحديثة وأساليبها. وفي النهاية، فإن الأجسام البالغة الصغر التي نتناولها بالدراسة لَهِيَ جزءٌ لا يتجزَّأ من اكتشافنا مَن نحن ومِن أين أتينا، أما البِنى الكبيرة الحجم التي نطمح إلى معرفة المزيد عنها، فيمكنها إلقاء الضوء على البيئة الكونية التي نعيش فيها، بالإضافة إلى أصل الكَوْن ومصيره. يتناول هذا الكتاب ما نأمل في العثور عليه، وكيف يمكن أن يحدث ذلك. إنها رحلة مثيرة ... ونرحب بك معنا فيها!

الجزء الأول

تقدير نطاق الواقع

الفصل الأول

الضئيل في نظرك ضخم في نظري

من بين الأسباب العديدة التي دفعتني لامتهان البحث في مجال الفيزياء، رغبتي في فعل شيء يدوم أثره للأبد؛ فما دمت سأستثمر هذا القدر الهائل من الوقت والجهد والالتزام، فالأفضل أن يكون ذلك من أجل شيء يتسم بالاستمرارية والمصداقية. وشأني شأن معظم الناس، رأيت في صور التقدم العلمي أفكارًا لا تطولها يدُ الزمان.

كانت صديقتي آنا كريستينا بوكمان قد درسَتِ اللغة الإنجليزية في الكلية، في حين تخصَّصْتُ أنا في الفيزياء. من قبيل المفارقة أنها درسَتِ الأدبَ للسبب ذاته الذي دفعني لدراسة الرياضيات والعلوم؛ فقد أَحَبَّتْ آنا الكيفية التي تدوم بها القصة ذات الرؤية المتعمقة لقرون. وعند مناقشتي رواية «توم جونز» للكاتب هنري فيلدينجز معها بعد سنوات عديدة، عرفت أن الطبعة التي قرأتُها واستمتعتُ بها للغاية هي الطبعة التي ساهمت آنا في كتابة الحواشي لها في أثناء دراستها العليا.[1]

نُشِرت رواية «توم جونز» منذ ٢٥٠ عامًا، بَيْدَ أن ما تتناوله من موضوعات وما تعكسه من بصيرة لا يزال صداه يتردَّد حتى يومنا هذا. وفي أثناء زيارتي الأولى لليابان، قرأت الرواية الأقدم عهدًا «قصة جنجي»، وأُعجِبت كثيرًا بمعاصرة شخصياتها، رغم مرور ألف عام على كتابة موراساكي شيكيبو لها. وقد ألَّف هوميروس كذلك ملحمة الأوديسة قبل ذلك الحين بنحو ٢٠٠٠ عام، ورغم أن التاريخ والسياق مغايران تمامًا لعصرنا الحالي، لا تزال رحلة أوديسيوس تمتِّعنا حتى الآن بما تشتمل عليه من أوصاف للطبيعة البشرية لا تتغير بمرور الزمن.

نادرًا ما يقرأ العلماء نصوصًا علمية بهذا القِدَم، بل نترك ذلك عادةً للمؤرخين والنقَّاد الأدبيين. ومع ذلك، فإننا نطبق المعرفة التي جمعناها على مرِّ الزمان، سواء أكانت مستمَدة من نيوتن في القرن السابع عشر أم كوبرنيكوس قبل ذلك الحين بأكثر

من ١٠٠ عام. قد نهمل الكتب نفسها، لكننا نحرص على الحفاظ على ما قد تحتويه من أفكارٍ مهمة.

لا ريب أن العلم ليس ذلك التعبير الجامد عن القوانين الكونية التي نسمع عنها جميعًا في مرحلة التعليم الابتدائي، وليس أيضًا مجموعة من القواعد الاعتباطية، وإنما العلم كيان معرفي متطور. وكثير من الأفكار التي نبحث فيها حاليًّا سيثبت خطؤها أو عدم اكتمالها يومًا ما؛ فالأوصاف العلمية تتغير بالتأكيد مع تخطينا حدود معرفتنا وخوضنا غمار المجهول لنصل إلى مناطق أبعد يمكننا فيها أن نلمحَ إشاراتٍ لحقائق أعمق.

والتناقض الذي يضطر العلماء لمواجهته هو أنه رغم التماسهم استدامة ما يتوصلون إليه من حقائق، فإنهم يبحثون غالبًا في أفكار سوف تجبرهم البيانات التجريبية أو الفهم الأفضل لها على تعديلها أو نبذها. والجوهر السليم للمعرفة، الذي طالما اختُبِر واعتُمِد عليه، محاطٌ دومًا بحدود مبهمة من عدم اليقين، وهي التي تمثِّل إطارَ البحث الحالي. فالأفكار والاقتراحات التي تثيرنا اليوم سرعان ما ستُنسَى إذا أبطلَتْ صحتَها أعمالٌ تجريبية أكثر إقناعًا وشمولية غدًا.

عندما انحاز مرشح الرئاسة الأمريكية الجمهوري، مايك هاكابي، في عام ٢٠٠٨ للدين ضد العلم — وكان أحد أسبابه في ذلك أن «المعتقدات» العلمية تتغيَّر، في حين يتخذ المسيحيون لهم من الرب سلطةً أبديةً غير متغيرة — فإنه لم يكن مخطئًا على نحو تامٍّ، على الأقل في وصفه؛ فالكَوْن يتطور، وكذلك معرفتنا العلمية به. وبمرور الوقت، يكشف العلماء سُتُرًا عن الحقيقة ليكشفوا عمَّا يقبع تحت السطح؛ فنتوسع في إدراكنا ونعزِّزه مع سبرنا أغوار نطاقات أبعد. إن المعرفة تتقدَّم، والمنطقة غير المُستكشَفة تتراجع حدودها عند وصولنا إلى هذه المسافات التي يصعب الوصول إليها، وبعد ذلك تتطور «المعتقدات» العلمية بما يتفق مع معرفتنا المتسعة.

رغم ذلك، حتى عندما تجعل التكنولوجيا المُحسَّنة الوصولَ إلى نطاقٍ أوسع من المشاهدات أمرًا ممكنًا، لا يعني ذلك بالضرورة أن نهجر النظريات التي تمكَّنَّا من الوصول إليها في الماضي وشكَّلت توقعاتٍ ناجحةً بشأن الأبعاد والطاقات، أو السرعات والكثافات. إن النظريات العلمية تنمو وتتسع لتستوعب قدرًا متزايدًا من المعرفة، مع الحفاظ على الأجزاء الموثوقة من الأفكار التي تشكَّلت في السابق. ومن ثم، فإن العلم يضم المعرفة القديمة المؤكَّدة إلى الصورة الأكثر شمولًا التي تتشكَّل من نطاق واسع

من المشاهدات النظرية والتجريبية. ومثل هذه التغييرات لا تعني بالضرورة أن القواعد القديمة خاطئة، لكنها قد تعني، مثلًا، أن هذه القواعد لم تَعُدْ تنطبق على نطاقات أصغر؛ حيث تم الكشف عن مكونات جديدة. وبناءً عليه، فإن المعرفة يمكنها استيعاب الأفكار القديمة، لكن مع الاتساع في نطاقها بمرور الوقت أيضًا، ومع ذلك سيظل هناك الكثير من الأمور التي يلزم اكتشافها. وكما هو الحال مع السفر الذي قد يكون ساحرًا — حتى إن لم تكن ستزور كل بقعة في العالم (ناهيك عن النظام الكوني) — فإن زيادة إدراكنا للمادة والكَوْن يثري من وجودنا، وما يظل مبهَمًا يحثنا على إجراء المزيد من الأبحاث.

يتناول المجال البحثي الذي أتخصَّص فيه — فيزياء الجسيمات — مسافات آخِذة في التناقص بهدف دراسة مكونات المادة الأدق حجمًا بالتتابع. فالأبحاث النظرية والتجريبية الحالية تسعى إلى الكشف عما تخفيه المادة؛ أي ما تُكِنُّه في أعمق جزء بداخلها، إلا أن المادة لا تشبه ببساطة الدمية الروسية ماتريوشكا، بما تنطوي عليه من تناسخ عناصر مشابهة على نطاقات يقل حجمها تباعًا، وإن كان ذلك تشبيهًا متداولًا. فما يجعل دراسة المسافات الآخِذة في التناقص أمرًا مثيرًا، هو أن القواعد يمكنها التغيُّر عند وصولنا إلى نطاقات جديدة، وقد تظهر قوًى وتفاعلات حديثة في هذه النطاقات، رغم أن أثَرَها كان ضئيلًا للغاية إلى درجة يستحيل معها اكتشافه على نطاق المسافات الأكبر التي تم البحث فيها في السابق.

إن مفهوم النطاق — الذي يوضِّح للفيزيائيين مدى الأحجام أو الطاقات ذات الصلة بأي بحث محدَّد — يعلب دورًا مهمًّا في فهم التقدم العلمي، فضلًا عن الكثير من الجوانب الأخرى للعالم من حولنا. ومن خلال تقسيم الكَوْن إلى أحجام مختلفة يمكن فهمها، نعرف أن أكثر قوانين الفيزياء نجاحًا لا تَسْرِي بالضرورة على جميع العمليات؛ ومن ثَمَّ علينا الربط بين المفاهيم التي تنطبق بنجاح في أحد النطاقات بتلك الأكثر نفعًا في نطاقات أخرى. والتصنيف على هذا النحو يسمح لنا بجَمْع كل ما نعرفه في صورة مُتَّسِقة، مع السماح بتغييرات جذرية في الأوصاف عند المسافات المختلفة.

في هذا الفصل، سنرى كيف أن التقسيم حسب النطاق — أيَّمَا كان النطاق الملائم — يساعد في إيضاح أفكارنا — سواء من الناحية العلمية أو غيرها — وتفسير لماذا يصعب ملاحظة السمات الدقيقة لِلَبِنات المادة الأساسية في نطاق المسافات التي نتعامل معها في حياتنا اليومية. وإلى جانب ذلك، يتناول هذا الفصل كذلك بالشرح المُفصَّل معنى

«الصواب» و«الخطأ» في العلم، ويستعرض لماذا لا تُسفِر بالضرورة الاكتشافاتُ التي قد تبدو جذريةً عن تغييرات هائلة في النطاقات المألوفة من جانبنا بالفعل.

المستحيل

في أحيان كثيرة، يخلط الناس بين المعرفة العلمية المتطورة وانعدام المعرفة، وبين حالة استكشاف قوانين فيزيائية جديدة والغياب التام للقواعد الموثوقة. وقد ساعدتني محادَثةٌ كنتُ قد أجريتها مع كاتب السيناريوهات، سكوت دريكسون، أثناء زيارةٍ قمتُ بها مؤخرًا لكاليفورنيا، في استيضاح الأسباب وراء بعض من حالات سوء الفهم هذه. كان سكوت يعمل حينذاك على كتابة بعض السيناريوهات التي تطرح فكرةَ وجودِ علاقات محتملة بين العلم وظواهر يظن سكوت أن العلماء سينبذونها على الأرجح لأنها خارقة للطبيعة. وسعيًا من سكوت لتجنُّب أي أخطاء في النص، أراد إضفاء موثوقية علمية على الأفكار التي ستعرضها قصته المُتخيَّلَة عن طريق فحص أحد الفيزيائيين لها، وهنا جاء دوري؛ فالتقيت به على الغداء في أحد المقاهي بمكان مفتوح لتبادُل الأفكار، مع الاستمتاع في الوقت نفسه بشمس ظهيرة لوس أنجلوس.

ولَمَّا كان سكوت يدرك أن الكتَّاب كثيرًا ما يُسِيئون تمثيل العلم، أراد أن تتسم قصصه عن الأشباح والسفر عبر الزمن بقدر معقول من المصداقية العلمية، وتمثَّلَ التحدي الذي واجَهَه ككاتب سيناريو في كونه لا يرغب في أن يقدِّم لجمهوره ظواهر جديدة وشائقة فحسب، وإنما أيضًا ظواهر يمكن نقلها بفعالية إلى شاشة السينما. ورغم عدم تلقِّيه تدريبًا علميًّا، فإنه اتسم بسرعة استيعابه للأفكار الجديدة؛ ومن ثَمَّ أوضحت له كيف أنه على الرغم من البراعة والقيمة الترفيهية لبعض أجزاء قصته، فإن القيود الفيزيائية تجعل هذه الأجزاء غير مدعومة من الناحية العلمية.

فجاء رد سكوت عليَّ بأن العلماء اعتقدوا باستحالة حدوث ظواهر معينة، وتبيَّنوا بعد ذلك صحتها. وقال لي: «أَلَمْ ينكر العلماء من قبلُ ما تخبرنا به النسبية الآن؟» و«مَن كان يظن أن العشوائية لعبت أي دور في قوانين الفيزياء الأساسية؟» بالرغم من احترام سكوت الهائل للعلم، فلا يزال يتساءل عمَّا إذا كان العلماء على خطأ أحيانًا بشأن تبعات اكتشافاتهم وحدودها، مع الوضع في الاعتبار الطبيعة المتطورة للعلم.

يذهب بعض النقاد إلى ما هو أبعد من ذلك، مؤكِّدين أنه رغم إمكانية تنبُّؤ العلماء بأمور كثيرة، تحيط الشكوك دومًا بمدى موثوقية هذه التنبؤات. ويُصِرُّ المتشكِّكون على

أنه رغم الأدلة العلمية، يمكن أن يكون هناك دومًا شرك أو ثغرة ما في الأمر، فربما يمكن للبشر العودة للحياة بعد الموت أو على الأقل الانتقال عبر منفذ ما إلى العصور الوسطى أو الدخول إلى الأرض الوسطى. باختصار، لا يثق هؤلاء المتشكِّكون في ادِّعاءات العلم بأن شيئًا ما مستحيل تمامًا.

مع ذلك، ورغم الحكمة التي ينطوي عليها الاتسام بعقل متفتح وإدراك وجود اكتشافات جديدة في انتظار مَن يكشِف عنها الستار، فثَمَّةَ مغالطة كبيرة متأصلة في هذا المنطق. تتضح المعضلة هنا عند تحليل معنى عبارات مثل الموضَّحَة أعلاه، وتطبيق مبدأ النطاقات عليها بوجه خاص. عندئذٍ، سنجد أن هذه التساؤلات تتغاضى عن حقيقة مهمة، وهي أنه رغم أنه ستكون هناك دومًا نطاقات للطاقة أو المسافة لم تُكتشَف بعدُ ومن الممكن أن تتغيَّر فيها القوانين الفيزيائية، فإن العلماء يعرفون القوانين الفيزيائية على النطاقات البشرية حق المعرفة. وقد توفَّر لهم ما يكفي من الفرص لاختبار صحة هذه القوانين على مدار قرون عديدة.

عندما التقيت بمصمِّمَة الرقصات إليزابيث ستريب في متحف ويتني — حيث كنَّا من المتحدثين بإحدى اللجان التي تناولت موضوع الإبداع — اكتشفتُ أنها تَبخس قدر قوة المعرفة العلمية على النطاقات البشرية؛ إذ طرحت إليزابيث سؤالًا مشابهًا للأسئلة التي طرحها سكوت، وهو: «هل يمكن للأبعاد الدقيقة التي يقترح الفيزيائيون وجودها، والتي يتعذَّر تخيُّل حجمها الصغير، أن تؤثِّر رغم ذلك على حركة أجسامنا؟»

كان عملها رائعًا، واستفساراتها المتعلقة بالافتراضات الأساسية للرقص والحركة مذهلة. بَيْدَ أن السبب وراء عدم تمكُّنِنَا من تحديد ما إذا كانت هناك أبعاد جديدة أم لا — أو ما هو دورها في حال وجودها — هو أنها صغيرة أو مطوية لدرجة يتعذَّر معها اكتشافنا لها. وأعني بذلك أننا لم نتعرَّف على تأثيرها بعدُ على أي كمية سبق لنا ملاحظتها، حتى مع أكثر القياسات تفصيلًا؛ فلا يمكن لنتائج الأبعاد الإضافية للظواهر الفيزيائية أن تؤثِّر على حركة أي شخص تأثيرًا يمكن إدراكه إلا إذا كانت هذه النتائج هائلة؛ وإذا كان لها هذا التأثير الهائل، فسنكون قد لاحظناها بالفعل. ومن ثَمَّ، فإننا نعلم أن أساسيات تصميم الرقصات لن تتغيَّر حتى إذا تطوَّر فهمنا للجاذبية الكمية، فآثار ذلك تكون مطموسة إلى حدٍّ كبير في إطار أي شيء يمكن إدراكه على أي نطاق بشري.

عندما اتَّضَح خطأ العلماء في الماضي، فإن ذلك كان يرجع عادةً إلى أنهم لم يكونوا قد استكشفوا بعدُ مسافات بالغة الصِّغَر أو الكِبَر، أو طاقات أو سرعات عالية للغاية. ولا

يعني ذلك أنهم — مثل اللوديين — قد أغلقوا عقولهم أمام إمكانية التقدم، وإنما أعني فقط أنهم وثقوا فيما توصَّلوا إليه من أحدث التوصيفات الرياضية للعالم، وتنبؤاتهم الناجحة بشأن السلوكيات والأجسام القابلة للملاحظة آنذاك. أما الظواهر التي اعتقدوا في استحالتها، فقد كان من الممكن أن تحدث — وحدثت بالفعل أحيانًا — على نطاق مسافات أو سرعات لم يكن أولئك العلماء قد توصَّلوا إليها — أو اختبروها — من قبلُ. لكنهم، بالطبع، ما كانوا ليعرفوا آنذاك الأفكار والنظريات الجديدة التي سادت بعد ذلك في أنظمة هذه المسافات الدقيقة أو الطاقات الهائلة التي كانوا يجهلونها في ذلك الوقت.

وعندما يقول العلماء إنهم يعلمون شيئًا ما، فهم لا يعنون بذلك إلا أن لديهم أفكارًا ونظريات محدَّدة خضعت تنبؤاتها للاختبار الدقيق «على نطاق معين من المسافات أو الطاقات»، وهذه الأفكار أو النظريات لا تمثِّل بالضرورة قوانين أبديةً لجميع العصور أو أساسًا للقوانين الفيزيائية، وإنما هي قواعد قد تنطبق على النحو الذي يمكن لأي تجربة اختباره في إطار المعطيات المتاحة للتكنولوجيا الحالية. ولا يعني ذلك أن هذه القوانين لن تحل محلَّها قوانين أخرى جديدة؛ فنظريات نيوتن، على سبيل المثال، نافعة وصحيحة، لكن فعاليتها تتوقف عند حدود سرعة الضوء التي تنطبق عليها نظرية أينشتاين، أو بالقرب من ذلك الحد؛ ومن ثمَّ فإن قوانين نيوتن صحيحة وغير كاملة في الوقت نفسه؛ فهي تنطبق على نطاق محدود.

والمعرفة الأكثر تطورًا، التي نكتسبها من خلال قياسات أكثر جودةً، تمثِّل تقدُّمًا حقيقيًّا يوضِّح لنا المفاهيم الضمنية الجديدة والمختلفة، فنعلم الآن بشأن الكثير من الظواهر التي ما كان القدماء ليستنتجوها أو يكتشفوها باتباع أساليب الملاحظة الأكثر محدوديةً التي كانوا يستخدمونها؛ لذا فإن سكوت كان محقًّا في أن العلماء قد جانبهم الصواب أحيانًا بظنهم أن ظواهرَ ما مستحيلةٌ واتَّضَحَ في النهاية أنها كانت صحيحة تمامًا. لكن ذلك لا يعني في الوقت نفسه أنه لا توجد قواعد تحكم ذلك؛ فالأشباح والمسافرون عبر الزمن لن يظهروا في منازلنا، والكائنات الفضائية لن تنشق عنها الجدران من حولنا فجأةً. ربما تكون هناك أبعاد إضافية للفضاء، لكنها لا بد من أن تكون دقيقةً للغاية أو مطوية أو مختفية حاليًّا عن نطاق رؤيتنا، ما يحول دون تمكُّنِنَا من تفسير عدم تركها أي أدلة ملحوظة على وجودها.

لعل الظواهر العجيبة موجودة بالفعل، لكن مثل هذه الظواهر لا تحدث إلا في إطار نطاقات يصعب ملاحظتها، وهي النطاقات البعيدة عن إطار فهمنا البديهي ومداركنا

المعتادة. وإذا ظلَّتْ منيعة هكذا على الدوام، فلا أهمية لها في نظر العلماء، بل تقل أهميتها لدى كتَّاب الخيال أيضًا؛ إذ لن يكون لها تأثير ملحوظ على حياتنا اليومية.



شكل ١-١: كاريكاتير على موقع «إكس كيه سي دي» يتناول الطبيعة الخفية للأبعاد الدقيقة غير المرئية.

الغرائب ممكنة، لكن أكثر ما يثير اهتمام غير الفيزيائيين — وهو أمر مُبرَّر — هو الأمور التي بوسعهم ملاحظتها؛ فمثلما أشار ستيفن سبيلبرج في مناقشة حول فيلم خيال علمي كان يفكِّر في تنفيذه، العالَم الغريب الذي لا يمكن تقديمه على شاشة السينما — ولا يمكن للشخصيات الموجودة فيه اختباره أبدًا — لا يهم المُشاهِد كثيرًا (يعرض الشكل ١-١ دليلًا طريفًا على ذلك)؛ فلا يثير اهتمام المُشاهِد سوى عالَم جديد بوسعه الوصول إليه وإدراكه. ورغم أن كلًّا من الأفكار المجردة والأدب غير الواقعي يتطلبان خيالًا، فهما أمران مختلفان وتتباين أهدافهما. قد تنطبق الأفكار العلمية على أنظمة بعيدة تمامًا عن نطاق اهتمام أي فيلم، أو نطاق ملاحظاتنا اليومية، لكنها رغم ذلك ضرورية في وصفنا للعالم المادي.

منعطفات خاطئة

بالرغم من هذا الفصل الدقيق حسب المسافات، كثيرًا ما يتبع الناس طرقًا مختصرة عندما يحاولون فهم العلوم الصعبة والعالَم من حولهم، ويمكن أن يُسفِر ذلك بسهولة عن اندفاع أهوج في تطبيق النظريات. وهذا التطبيق الخاطئ للعلم ليس ظاهرة جديدة؛ ففي القرن الثامن عشر، وبينما انشغل العلماء بدراسة المغناطيسية في المختبرات، شكَّل

آخرون في أذهانهم مفهومَ «المغناطيسية الحيوانية»، وهي عبارة عن «سائل حيوي» مغناطيسي افتُرِض وجوده في الكائنات الحية. وتطلَّبَ فضح زيف هذه الفرضية رسميًّا آنذاك تشكيلَ لجنةٍ ملكية فرنسية على يد لويس السادس عشر في عام ١٧٨٤، والتي ضمَّتْ بين أعضائها بنجامين فرانكلين.

أما في وقتنا الحالي، فتدور غالبًا مثل هذه الاستقراءات المضللة حول ميكانيكا الكم؛ إذ يحاول الناس تطبيقها على نطاقات عيانيَّة تتعادل فيها تبعات ميكانيكا الكم؛ ومن ثَمَّ لا تترك أي آثار مميزة يمكن قياسها.[2] ومن الأمور المزعجة ذلك العدد الكبير من الناس الذين يثقون في أفكار مثل تلك التي يعرضها كتاب روندا بايرن الأكثر بيعًا «السر»، بشأن كيفية جذب الأفكار الإيجابية للثروة والصحة والسعادة. وما لا يقل عن ذلك إثارةً للقلق ادِّعَاءُ بايرن ما يلي: «لم تسبق لي دراسة العلوم أو الفيزياء في المدرسة، لكنني عندما قرأت الكتب المعقَّدَة التي تتناول فيزياء الكم، استوعبتها تمامًا لأنني أردتُ أن استوعبها. ودراسة فيزياء الكم أعانتني على التوصُّل إلى فهم أعمق بشأن «السر»، على مستوى الطاقة.»

يحضرني هنا قول نيلز بور، رائد ميكانيكا الكم والحاصل على جائزة نوبل: «إذا لم تتسبَّبْ ميكانيكا الكم في ارتباكك ارتباكًا تامًّا، فاعلم أنك لا تفهمها.» وإليك سرًّا آخَر (وهو سر مؤمَّن، على الأقل بالقدر نفسه من التأمين الذي يتمتع به السر الموجود في ذلك الكتاب الأكثر بيعًا): تشتهر ميكانيكا الكم بإساءة فهمها. فكلٌّ من حدسنا ولغتنا مستمد من «التفكير الكلاسيكي» الذي لا يأخذ ميكانيكا الكم في الاعتبار، لكن ذلك لا يعني أن أي ظاهرة غريبة ممكنة بمنطق الكم. وحتى دون أن نفهم ميكانيكا الكم على نحو أكثر عمقًا وجوهريةً، فإننا نعلم كيف نستخدمها للتوصُّل إلى تنبؤات. وميكانيكا الكم ليست مسئولة بالتأكيد عن «سر» بايرن المتعلق بذلك المبدأ المعروف باسم «مبدأ الجذب» بين الأفراد والأشياء أو الظواهر البعيدة. فعلى نطاق هذه المسافات البعيدة، لا تلعب ميكانيكا الكم هذا الدور، ولا علاقة لها كذلك بالكثير من الأفكار المثيرة التي ينسبها الناس لها عادةً. فأنا لا يمكنني التأثير في تجربة ما بالتحديق فيها، وميكانيكا الكم لا تعني أنه لا يوجد تنبؤات يمكن الاعتماد عليها، ومعظم القياسات محكومة بقيود عملية وليس بمبدأ عدم اليقين.

شكَّلَتْ هذه المغالطات الموضوعَ الرئيسي لمحادثة مدهشة جمعتني بمارك فيسنتي، مخرج فيلم «ماذا نعلم بحق الجحيم؟!» وهو فيلم كارثي في حق العلماء؛ إذ يدَّعِي فيه

الناس أن التأثير البشري له أهمية في التجارب. لم أكن متأكِّدة إلامَ ستؤدي بنا تلك المحادثة، لكن كان لديَّ وقت فراغ أثناء جلوسي في مطار دالاس/فورت وورث لعدة ساعات في انتظار إصلاح الميكانيكيين لمشكلةٍ ما أصابت جناح الطائرة (وهي المشكلة التي وُصِفت في بادئ الأمر بأنها أبسط من أن نلقي لها بالًا، لكنها فيما بعدُ «قيست بالوسائل التكنولوجية» قبل أن تتمكن الطائرة من الإقلاع، كما أخبرنا أحد أفراد الطاقم).

أدركتُ آنذاك أنه حتى في ظل ذلك التأخير، إذا كنت سأتحدث مع مارك ولو لدقائق معدودة، فعليَّ أن أعرف موقفه من الفيلم الذي قدَّمَه، وهو الفيلم الذي يرجع سبب معرفتي به للعدد الكبير من الأشخاص الذين طرحوا عليَّ أسئلةً غايةً في الغرابة أثناء المحاضرات التي كنتُ ألقيها، وذلك استنادًا إلى ما شاهدوه فيه. فاجأتني إجابة مارك عن سؤالي؛ إذ بدا مصدومًا، وأفضى لي بسرٍّ، وهو أنه تناوَلَ العلم في البداية بناءً على مفاهيم سابقة لديه لم يدقِّق فيها على النحو الكافي، لكنه يرى الآن أن تفكيره السابق اتَّسَمَ بطبيعة دينية أكثر من أي شيء آخَر. وختم مارك حديثه بأن ما قدَّمَه في فيلمه لم يكن عِلْمًا. ولعل تقديم ظواهر ميكانيكا الكم على مستوًى بشري قد حقَّق رضًى سطحيًّا للعديد من مُشاهِدِي الفيلم، لكن ذلك لا يعني أنه صحيح.

لكن حتى لو تطلَّبَتِ النظريات الجديدة افتراضات مختلفة اختلافًا جذريًّا — كما كان الحال بالتأكيد مع ميكانيكا الكم — فالتجارب والمناقشات العلمية السليمة أثبتَتْ في النهاية صحتها. ولم يكن ذلك بالأمر المُستغرَب؛ فالمنهج العلمي، بالإضافة إلى البيانات وعمليات البحث عن التوفير والاتساق، أوضح للعلماء كيف يتجاوزون بمعرفتهم ما هو حدسي على مستوى النطاقات التي يسهل الوصول إليها مباشَرةً ليصلوا إلى أفكار مختلفة تمامًا تنطبق على ظواهر ليست حدسية.

يستعرض القسم التالي مزيدًا من المعلومات حول الكيفية التي يربط بها مفهوم النطاق بين المفاهيم النظرية المختلفة، ويتيح لنا جمع هذه المفاهيم في كيان واحد متماسك.

النظريات الفعَّالة

يتصادف أن يقع حجمنا كبشر بالقرب من منتصف المسافة، المقدَّرة بالقوى العشرية، بين أقصر الأطوال التي يمكن تخيُّلها من جانب والكَوْن بضخامته من الجانب الآخَر.[3] فحجمنا كبير للغاية مقارَنةً بالبنية الداخلية للمادة ومكوناتها الدقيقة، وضئيل للغاية

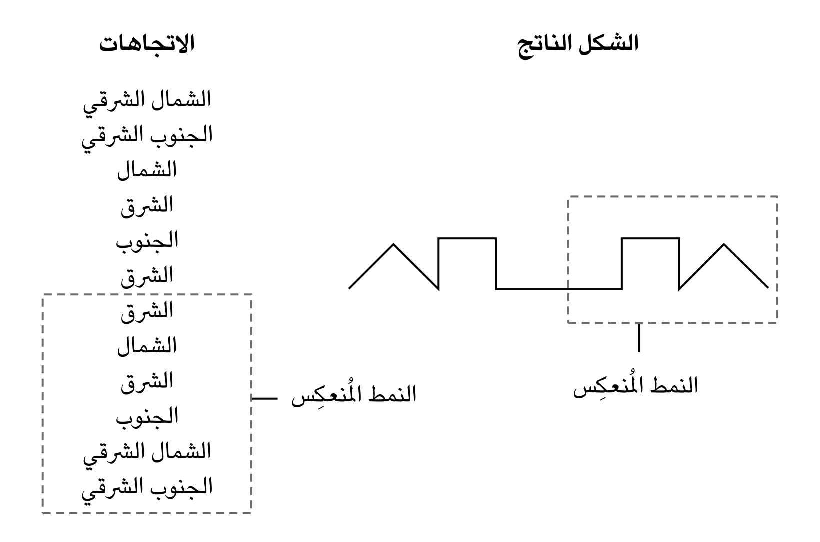
مقارَنةً بالنجوم والمجرات واتساع الكَوْن. وأكثر الأحجام التي يمكننا استيعابها هي أكثرها قابليةً لوصولنا إليها باستخدام الحواس الخمس وأكثر أدوات القياس بدائية، أما النطاقات الأبعد، فنستوعبها عن طريق الملاحظات والاستنتاجات المنطقية. وقد يبدو أن نطاق الأحجام يضم كميات أكثر تجرُّدًا وصعوبةً في تتبعها عند ابتعادنا عن النطاقات التي يمكن استيعابها ورؤيتها مباشرةً، لكن التكنولوجيا، المجتمعة بالنظريات، تسمح لنا بتحديد طبيعة المادة عبر نطاق هائل من الأطوال.

تنطبق النظريات العلمية المعروفة على هذا النطاق الهائل الذي يتراوح ما بين مسافات في صغر الأحجام الدقيقة التي يكتشفها مصادم الهادرونات الكبير، وصولًا إلى الأطوال الضخمة للمجرات والنظام الكوني، وفي كل حجم ممكن للأجسام أو المسافة بينها، يمكن للجوانب المختلفة لقوانين الفيزياء أن تكون ذات صلة، وعلى الفيزيائيين التأقلُم مع الكم الهائل من المعلومات التي تنطبق على هذا النطاق العريض. وعلى الرغم من أن أغلب قوانين الفيزياء الأساسية، التي تسري على هذه الأطوال الدقيقة، مسئولة في النهاية عن القوانين المتعلقة بالنطاقات الأكبر، فهي ليست بالضرورة أكثر الوسائل فعاليةً في إجراء الحسابات. وعندما لا تقدِّم الأساسات أو البِنى التحتية الإضافية إجابة دقيقة على نحو كافٍ، نكون بحاجة لأسلوب أكثر عملية للحساب ولتطبيق قواعد أبسط بفعاليةٍ.

ومن أهم ملامح الفيزياء أنها توضِّح لنا كيفية تحديد مجموعة النطاقات المتعلقة بأي قياس أو تنبؤ — وفقًا للدقة المتوفرة لدينا — ثم إجراء الحسابات تبعًا لذلك. ويتمثل جمال هذا الأسلوب في النظر إلى العالم في كونه يُمكِّننا من التركيز على النطاقات ذات الصلة بأي شيء يهمنا، وتحديد العناصر التي تعمل عند هذه النطاقات، واكتشاف القواعد التي تحكم كيفية ارتباط هذه المكونات وتطبيقها. يحسب العلماء متوسطات العمليات الفيزيائية التي تحدث على نطاقات صغيرة غير قابلة للقياس — بل قد يتجاهلونها (دون قصد أحيانًا) — عند وضع النظريات أو إعداد الحسابات؛ فنحن نحدِّد الحقائق ذات الصلة، ونستبعد التفاصيل عندما يتسنَّى لنا ذلك، ونركِّز على أكثر النطاقات نفعًا، وفعل ذلك هو السبيل الوحيد للتأقلُم مع القدر الهائل من المعلومات التي لدينا.

ويكون من المنطقي تجاهُل التفاصيل الدقيقة الثانوية — متى كان ذلك ملائمًا — من أجل التركيز على الموضوع محل الاهتمام وعدم حجبه بتفاصيل غير مهمة. وقد

ذكَّرتني إحدى المحاضرات التي ألقاها مؤخرًا ستيفن كوسلين، أستاذ علم النفس بجامعة هارفرد، كيف أن العلماء — وكلَّ مَن سواهم — يحبون متابعة المعلومات. وفي تجربة خاصة بعلم الإدراك أجراها على الجمهور، طلب منَّا جميعًا تتبُّع خطوطٍ عرَضها على الشاشة واحدًا تلو الآخَر. كان كل خط يتحرك ناحية «الشمال» أو «الجنوب الشرقي» وهكذا، فشكَّلَتْ جميع الخطوط في النهاية خطًّا متعرجًا (انظر الشكل ١-٢)، وطُلِبَ منَّا غلق أعيننا والتعبير عما رأيناه؛ فلاحظنا أنه رغم أن عقولنا سمحت لنا بتتبُّع عدد قليل فقط من الخطوط الفردية في المرة الواحدة، فإننا تمكَّنَّا من تذكُّر تسلسلات أطول من خلال تجميعها في أشكال قابلة للتكرار. من خلال التفكير على نطاق الشكل الإجمالي، وليس الخط الفردي، تمكَّنَّا من تذكُّر الشكل في عقولنا.



شكل ١-٢: يمكنك أن تختار الخط الفردي أو وحدة أكبر، مثل مجموعة مكوَّنة من ستة خطوط تظهر مرتين، لتكون المكون الخاص بك.

وفي أغلب ما تراه أو تسمعه أو تتذوقه أو تشمه أو تلمسه، أمامك الخيار بين التحقُّق من التفاصيل عن طريق التدقيق من ناحية أو النظر إلى «الصورة الأشمل» وأولوياتها الأخرى من ناحية أخرى. فسواء أكنتَ تشرع في رسم لوحة، أم تتذوَّق النبيذ،

أم تقرأ في الفلسفة، أم تخطِّط لرحلتك القادمة، فإنك تصنِّف تلقائيًّا أفكارَكَ إلى فئاتٍ مهمةٍ — حسب الأحجام، أو النكهات، أو الأفكار، أو المسافات — وفئاتٍ أخرى لا تجدها ذات صلة في الوقت الحالي.

والفائدة التي تعود من التركيز على الأسئلة الوثيقة الصلة بالموضوع وتجاهُل البِنى الأصغر من أن تكون ذات صلة؛ تنطبق على العديد من السياقات. فَلْتفكِّر فيما تفعله عند استخدامك تطبيق «ماب كويست» أو «خرائط جوجل»، أو عند نظرك في الشاشة الصغيرة لهاتف «آي فون» الخاص بك. إذا كنتَ مسافرًا من مكان قصي، فستكوِّن في البداية فكرةً بسيطةً عن وجهتك، وبعد أن تحصل على الصورة الأشمل، ستقوم بتصغير الخريطة بدقة أكبر؛ فلستَ بحاجة إلى معلومات تفصيلية إضافية في المرة الأولى، وإنما ترغب فقط في تكوين نظرة عامة عن موقعك، لكنك عندما تبدأ في التحقُّق من تفاصيل رحلتك — مع زيادة الدقة في عرض تفاصيل الشارع الذي تقصده بالضبط — ستهتم بالتفاصيل الأدق التي لم تكن مهمة في عملية الاستكشاف الأولى التي قمتَ بها.

لا ريب أن درجة الدقة التي تبغيها أو تحتاجها تحدِّد النطاق الذي ستختاره. لديَّ بعض الأصدقاء لا يهتمون كثيرًا بموقع الفندق الذي سيقيمون فيه عند زيارتهم لمدينة نيويورك؛ فالاختلافات في خصائص الوحدات السكنية في المدينة لا أهمية لها في نظرهم، لكن في نظر أي شخص يعرف نيويورك جيدًا، هذه الأمور تهم. ليس كافيًا معرفة أنك ستقيم في وسط المدينة؛ فأهالي نيويورك يهتمون بما إذا كانوا في بداية شارع هيوستن أم آخِره، أو شرق متنزه «واشنطن سكوير بارك» أم غربه، بل يهتمون كذلك بما إذا كانوا يبعدون عن وجهتهم بمربعين سكنيين أم بخمسة مربعات سكنية.

ورغم أن الاختيار الدقيق للنطاق قد يختلف من شخص لآخَر، فما من أحد سيعرض خريطة للولايات المتحدة بأكملها من أجل العثور على مطعم ما؛ فالتفاصيل الضرورية لن تظهر بوضوح على شاشة الكمبيوتر الذي يعرض مثل هذا النطاق المتسع. على الجانب الآخَر، لا حاجة لك في عرض تفاصيل تخطيط طابق ما لمعرفة أن المطعم موجود به في الأساس؛ فلكل استفسار تطرحه نطاق مناسب تختاره (انظر الشكل ١-٣ للاطلاع على مثال آخَر).

من المنطلق ذاته، نجري التصنيفات في الفيزياء حسب الحجم لنتمكَّن من التركيز على الأسئلة محل الاهتمام. على سبيل المثال، سطح الطاولة يبدو صلبًا — ويمكننا التعامل معه على هذا الأساس في العديد من الأغراض — لكنه في الحقيقة مكوَّن من

برج إيفل

شكل ١-٣: المعلومات المختلفة تصبح أكثر وضوحًا عند عرضها على نطاقات متباينة.

ذرات وجزيئات تعمل في مجموعها كالسطح الصلب عديم النفاذ الذي نراه في سياقات متعددة من حياتنا اليومية، وهذه الذرات قابلة للتقسيم بدورها؛ فهي مكوَّنة من نوًى وإلكترونات، والنوى بدورها مكوَّنة من بروتونات ونيوترونات، وهي ترابطات بين أجسام أكثر جوهريةً تُسمَّى الكواركات. لكننا لسنا بحاجة لمعرفة الكواركات لفهم الخصائص الكهرومغناطيسية والكيميائية للذرات والعناصر (ويُعرَف هذا المجال العلمي باسم الفيزياء الذرية)؛ فقد درس الناس الفيزياء الذرية لسنوات عديدة قبل ظهور أي دليل على الإطلاق على البنى التحتية للذرة. وعند دراسة علماء الأحياء للخلية، لا حاجة لهم بمعرفة الكواركات الموجودة داخل البروتون أيضًا.

أتذكَّرُ شعوري بشيء من الخيانة عندما أخبرنا المدرس في المرحلة الثانوية — بعد شهور من تدريس قوانين نيوتن لنا — أن هذه القوانين خاطئة. لكنه لم يكن محقًّا تمامًا فيما قاله؛ إذ إن قوانين نيوتن عن الحركة صحيحة في إطار المسافات والسرعات القابلة للملاحظة في عصره. لقد فكَّرَ نيوتن في قوانين الفيزياء التي كان بالإمكان تطبيقها حينها، مع الوضع في الاعتبار مدى الدقة التي استطاع هو (أو أي أحد غيره آنذاك) إجراء القياسات بها. ولم يكن بحاجة لتفاصيل النسبية العامة للتوصُّل إلى تنبؤات صحيحة بشأن ما يمكن قياسه حينذاك، والأمر نفسه ينطبق علينا عند إجرائنا تنبؤات تتعلق بالأجسام الكبيرة عند السرعات والكثافات التي تنطبق عليها قوانين نيوتن. فعندما يدرس الفيزيائيون أو المهندسون الآن مدارات الكواكب، لا يحتاجون بدورهم إلى معرفة

التركيب المُفصَّل للشمس. والقوانين التي تحكم سلوك الكواركات لا تؤثِّر بشكل ملحوظ على التنبؤات المتعلقة بالأجرام السماوية أيضًا.

ونادرًا ما يكون فهم المكونات الأكثر جوهريةً هو السبيل الأمثل لفهم التفاعلات على نطاقات أكبر؛ حيث تلعب البنية التحتية الدقيقة دورًا بسيطًا للغاية بوجه عام. على سبيل المثال، يصعب علينا تحقيق التقدم في الفيزياء الذرية بدراسة الكواركات الأدق حجمًا؛ فلا حاجة لدراسة بنية الكوارك التحتية إلا عندما نرغب في معرفة خصائص النوى الأكثر تفصيلًا. وفي غياب الدقة البعيدة الغور، يمكننا إجراء الدراسات في الكيمياء والأحياء الجزيئية مع تجاهُل أي بنية تحتية داخلية للنواة. من ناحية أخرى، لن تتغيَّر حركات إليزابيث ستريب مهما حدث على مستوى الجاذبية الكمية؛ فتصميم الرقصات لا يعتمد إلا على قوانين الفيزياء التقليدية.

يفضل الجميع — بما في ذلك الفيزيائيون — استخدامَ وصفٍ أبسط عندما تتجاوز التفاصيل درجة الدقة التي نعمل عندها. يضفي الفيزيائيون على هذا الحدس الصبغة الرسمية، وينظمون الفئات من حيث المسافة أو الطاقة ذات الصلة. وعند تناول أي مشكلة، نستخدم ما نطلق عليه اسم «النظرية الفعالة». والنظرية الفعَّالة تركِّز على الجزيئات والقوى التي لها «آثار» على المسافات محل الاهتمام. وبدلًا من توصيف الجسيمات والتفاعلات بمعايير تصف سلوكًا أكثر جوهرية ولا يمكن قياسها، نصوغ النظريات والمعادلات والملاحظات من حيث الأشياء التي لها صلة بالفعل بالنطاقات التي نستكشفها.

والنظرية الفعالة التي نطبِّقها على مسافات أكبر لا تتناول تفاصيل النظرية الفيزيائية الأساسية التي تنطبق على نطاق مسافات أقصر، ولا تتساءل إلا عن الأشياء التي يمكنك أن تطمح في قياسها أو رؤيتها، وإذا وقع شيء ما خارج دقة النطاقات التي تعمل عندها، فلن تكون بحاجة إلى بنيتها المُفصَّلة. وليس ذلك بتحايل علمي، وإنما هو طريقة لتجاهل تكدُّس المعلومات غير الضرورية، وهو وسيلة «فعَّالة» للحصول على إجابات دقيقة بما فيه الكفاية، ومتابعة ما يوجد في النظام الذي تدرسه.

وسبب نجاح النظريات الفعَّالة أنه ما من ضرر في غضِّ الطرف عمَّا هو مجهول، طالما أنه لن يُسفِر عن أي اختلافات قابلة للقياس. فإذا حدثت الظواهر المجهولة على مدى نطاقات أو مسافات أو مستويات من الدقة يتعذَّرُ معها تمييز أثرها، فلسنا بحاجة لمعرفتها من أجل إجراء تنبؤات صحيحة. وبطبيعة الحال، ليس للظواهر التي تتجاوز

قدرتنا الفنية الحالية في الوصول إليها أيُّ عواقب قابلة للقياس إلى جانب تلك التي أخذناها في الاعتبار بالفعل.

لهذا السبب، وبدون معرفة أي معلومات عن الظواهر الجوهرية — مثل وجود القوانين النسبية للحركة، أو وصف ميكانيكا الكم للأنظمة الذرية ودون الذرية — يظل بإمكان الناس إجراء تنبؤات دقيقة، وهذا لحسن حظنا؛ إذ إننا ببساطة لا يمكننا التفكير في كل شيء في نفس الوقت، ولن نصل أبدًا إلى أي شيء إذا لم نستبعد التفاصيل غير ذات الصلة. وعندما نركِّز على الأسئلة التي يمكننا اختبارها تجريبيًّا، تجعل دقتنا المحدودة من هذا الكم من المعلومات المختلطة أمرًا غير ضروري.

الأمور «المستحيلة» يمكن أن تحدث، لكن في البيئات التي لم نلحظها بعدُ فقط، وتكون نتائجها غير ذات صلة في النطاقات التي نعرفها، أو على الأقل في النطاقات التي توصَّلْنَا إليها، فما يحدث في نطاق هذه المسافات الأصغر يظل خفيًّا إلى أن يتم تطوير أدوات ذات دقة أعلى لاستكشافها مباشَرةً، أو حتى تعمل قياسات دقيقة بما فيه الكفاية على تمييز النظرية الجوهرية وتحديدها من خلال الخصائص الدقيقة المميزة التي تقدِّمها على نطاق المسافات الأكبر.

ويجوز للعلماء تجاهُل كلِّ ما هو أصغر مما يمكن ملاحظته عند وضع التنبؤات؛ فليس من المستحيل التمييز بين نتائج العمليات والأجسام الدقيقة للغاية وحسب، وإنما لا تكون آثار العمليات عند هذه النطاقات مثيرةً للاهتمام إلا بقدر ما تحدد من معايير قابلة للقياس فيزيائيًّا. ومن ثَمَّ، فإن الفيزيائيين يصفون الأجسام والسمات عند نطاقات قابلة للقياس في أي نظرية فعَّالة، ويستخدمونها لإجراء الدراسات العلمية المتعلقة بالنطاقات التي يتناولونها، وعندما تعرف تفاصيل المسافات القصيرة، أو البنية الدقيقة لنظرية ما، يمكنك التوصُّل إلى الكميات في الوصف الفعَّال من خلال بنية مفصلة أكثر جوهرية، ودون ذلك لا تكون هذه الكميات سوى كيانات مجهولة لا يمكن تحديدها تجريبيًّا. والكميات التي يمكن ملاحظتها على نطاقات أكبر في النظرية الفعَّالة لا تقدِّم الوصف الجوهري، لكنها وسيلة ملائمة لتنظيم الملاحظات والتنبؤات.

والوصف الفعَّال يمكن أن يلخِّص نتائج أي نظرية تتناول مسافات أقصر، وتنتج ملاحظات على نطاق أكبر، لكنَّ آثارَها المباشرة أدقُّ مما يمكن ملاحظته. ولهذا فائدته؛ إذ يسمح لنا بدراسة العمليات وتقييمها باستخدام معاملات أقل مما نحتاج إليه إذا أخذنا كل تفصيل في الاعتبار. وهذه المجموعة الأصغر حجمًا ملائمة تمامًا لوصف العمليات التي

نهتم بها. بالإضافة إلى ذلك، فإن مجموعة المعايير التي نستخدمها هي معايير «عامة»؛ أي ثابتة بغض النظر عن العمليات الفيزيائية الجوهرية الأكثر تفصيلًا. ولمعرفة قِيَم هذه المعايير، ليس علينا سوى قياسها في أيٍّ من العمليات الكثيرة التي تنطبق عليها.

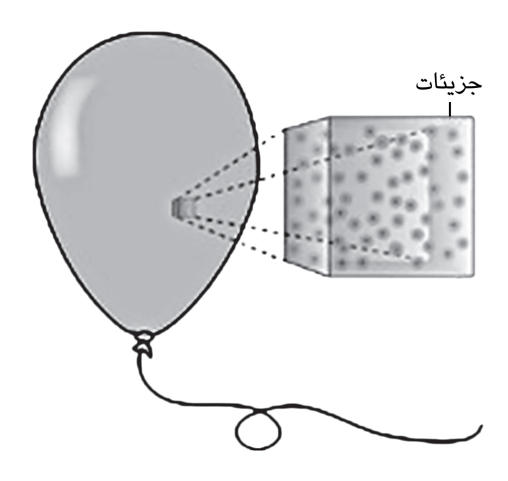
هذا وتنطبق النظرية الفعَّالة الواحدة على نطاق كبير من الأطوال والطاقات، وبعد تحديد المعاملات القليلة لها من خلال القياسات، يمكن حساب أي شيء يتناسب مع هذه المجموعة من النطاقات؛ فهي تقدِّم مجموعةً من العناصر والقواعد التي يمكن أن تفسِّر عددًا كبيرًا من الملاحظات. والنظرية التي نظنُّها أساسية يمكن أن تتحول في أي وقت إلى نظرية فعَّالة؛ لأنه ليس بالإمكان أن يكون لدينا دقة تامة لا نهائية، لكننا نثق في النظرية الفعَّالة؛ لأنها تنجح في التنبؤ بالكثير من الظواهر التي تنطبق على مجموعة كبيرة من نطاقات الأطوال والطاقات.

والنظريات الفعَّالة في الفيزياء لا تُتابِع المعلومات المتعلقة بالمسافات القصيرة فحسب، وإنما يمكن أن تلخِّص كذلك آثارَ المسافات الطويلة التي قد تكون نتائجها أدق أيضًا مما يمكن ملاحظته. على سبيل المثال، الكون الذي نعيش فيه منحنٍ انحناءً بسيطًا للغاية، وهذا ما أخبرنا أينشتاين بإمكانية حدوثه عندما وضع نظرية الجاذبية الخاصة به، وهذا الانحناء ينطبق على نطاقات أكبر تشمل بنية الفضاء ذات النطاق الكبير، لكننا يمكن أن نفهم على نحو منهجي لماذا تُعَدُّ آثار هذا الانحناء أصغر من أن يكون لها أهمية فيما يتعلق بمعظم الملاحظات والتجارب التي نُجرِيها محليًّا على نطاقات أصغر بكثير. ولا حاجة لنا في التفكير في مثل هذه الآثار — الأدق من أن يكون لها أهمية فيما يتعلق بالكثير مما أصفه في هذا الكتاب — إلا عند تضميننا للجاذبية في وصفنا لفيزياء الجسيمات، وفي هذه الحالة أيضًا، توضِّح لنا النظرية الفعَّالة المناسِبة كيفيةَ تلخيص آثار الجاذبية في عدد قليل من المعاملات المجهولة التي يمكن تحديدها تجريبيًّا.

ومن أكثر جوانب النظرية الفعَّالة أهميةً أنها في الوقت الذي تصف فيه ما يمكننا رؤيته، فإنها تصنِّف أيضًا ما هو غير موجود، سواء أكان ذلك على نطاق صغير أم كبير. ومع أي نظرية فعَّالة، يمكننا تحديد حجم التأثير الذي يمكن أن تُحدِثه الديناميكيات الأساسية المجهولة (أو المعلومة) عند أي قياس معين. وحتى قبل التوصُّل إلى اكتشافات جديدة عند نطاقات مختلفة، يمكننا أن نحدِّد رياضيًّا أقصى مدى للتأثير الذي يمكن أن تُحدِثه أي بنية جديدة على النظرية الفعَّالة في إطار النطاق الذي نعمل عليه. ومثلما سنرى في الفصل الثاني عشر، لا يتحقَّق الاستيعاب الكامل للحدود الفعلية لأي نظرية فعَّالة إلا عند اكتشاف الجوانب الفيزيائية الخفية لها.

تُعَدُّ الديناميكا الحرارية من النماذج المألوفة للنظرية الفعَّالة. توضِّح لنا الديناميكا الحرارية كيف تعمل الثلاجات والمحركات، وقد وُضِعَتْ هذه النظرية قبل النظرية الذرية أو الكمية بفترة طويلة. من الخصائص المميزة للحالة الديناميكية الحرارية لأي نظام: الضغط، والحرارة، والحجم. ورغم أننا نعلم أن النظام يتكوَّن بشكل أساسي من غاز مكوَّن من ذرات وجزيئات — ذات بنية أكثر تفصيلًا بكثير مما يمكن للكميات الثلاث السابقة وصفها — فإنه من أجل تحقيق أهداف عديدة يمكننا التركيز على هذه الكميات الثلاث فحسب، لوصف سلوك النظام الذي يمكن ملاحظته بالفعل.

يمثل كلٌّ من الحرارة والضغط والحجم كميات حقيقية يمكن قياسها، وقد تمَّ الانتهاء من صياغة النظرية التي تقوم عليها العلاقات بين هذه العناصر الثلاثة، وهي نظرية يمكن استخدامها لإجراء تنبؤات ناجحة. والنظرية الفعَّالة لغازٍ ما لا تذكر أيًّا من البنى الجزيئية الأساسية لهذا الغاز (انظر الشكل ١-٤). وبالرغم من أن السلوك الذي تنهجه هذه العناصر الأساسية يحدِّد الحرارة والضغط، فقد ارتضى العلماء باستخدام هذه الكميات في إجراء الحسابات حتى قبل اكتشاف الذرات والجزيئات.



شكل ١-٤: يمكن فهم الضغط ودرجة الحرارة على نحو أدق في إطار الخصائص الفيزيائية للجزيئات الفردية.

بمجرد أن تُفهَم النظرية الأساسية، يمكننا الربط بين درجة الحرارة والضغط من جانب، وخصائص الذرات من جانب آخَر، بالإضافة إلى إدراك متى يبطل تحليل الوصف الديناميكي الحراري. لكن يظل بإمكاننا استخدام الديناميكا الحرارية في العديد من التنبؤات. في الواقع، لا يمكن فهم الكثير من الظواهر إلا من وجهة نظر ديناميكية حرارية؛ وذلك لأنه بدون قدر ضخم من الذاكرة والقوة الحسابية — الذي يتجاوز كثيرًا ما هو موجود بالفعل — لا يمكننا تتبُّع مسارات كافَّة الذرات الفردية. وتُعَدُّ النظرية الفعَّالة السبيل الوحيد الآن لفهم بعض الظواهر الفيزيائية المهمة الوثيقة الصلة بالمادة «المُكثَّفة» السائلة والصلبة.

يوضِّح لنا هذا المثال جانبًا آخَر مهمًّا للنظريات الفعَّالة، فنحن نتعامل عادةً مع كلمة «أساسي» كوصف نسبي. من منظور الديناميكا الحرارية، الوصف الذري والجزيئي أساسي، لكن في وصف فيزياء الجسيمات — الذي يوضِّح بالتفصيل الكواركات والإلكترونات داخل الذرات — فإن الذرة «مركبة»؛ أي إنها مكوَّنَة من عناصر أصغر حجمًا، واستخدامها من منظور فيزياء الجسيمات يُعَدُّ نظرية فعَّالةً.

هذا الوصف لتطوُّر العلم المباشِر مما هو مفهوم جيدًا إلى ما يقع على حدود المعرفة ينطبق في أفضل صوره على مجالات مثل الفيزياء وعلم الكونيات، وهي المجالات التي نتمتع فيها بفهم واضح للوحدات الوظيفية والعلاقات بينها. والنظريات الفعَّالة لا تعمل بالضرورة في المجالات الحديثة، مثل علم أحياء الأنظمة؛ حيث لم تُستوعَب بعدُ العلاقاتُ بين الأنشطة على المستوى الجزيئي والمستويات المجهرية الأخرى، وآليات التغذية الراجعة المناسبة، استيعابًا كاملًا.

رغم ذلك، فإن فكرة النظرية الفعَّالة تنطبق على نطاق واسع من السياقات العلمية. فالمعادلات الرياضية التي تحكم تطوُّر الأنواع لن تتغيَّر استجابةً لظهور نتائج فيزيائية جديدة، وهذا ما تناقشْتُ بشأنه مع عالم الأحياء الرياضي، مارتن نواك، ردًّا مني على سؤال طرحه عليَّ. بإمكانه هو وزملائه وصفُ أي معاملات بعيدًا عن أي أوصاف أساسية، وبإمكانهم في النهاية الربط بين هذه المعاملات ومزيدٍ من الكميات الأساسية — الفيزيائية وغيرها — لكن ذلك لا يغيِّر من المعادلات التي يستخدمها علماء الأحياء الرياضية في تطوير سلوك الجماعات بمرور الوقت.

تلعب النظريات الفعَّالة دورًا مهمًّا لدى فيزيائيي الجسيمات، فهم يفصلون الأنظمة البسيطة في نطاقات مختلفة ويربطون بينها. في الواقع، إن خاصية الخفاء على الرؤية

التي تتسم بها البنية الأساسية وتسمح لنا بالتركيزِ على النطاقات القابلة للملاحظة وتجاهُلِ الآثار الأكثر جوهريةً، هي التي تحافظ على التفاعلات الأساسية محجوبة تمامًا بحيث لا يمكننا التنقيب عنها إلا باستنزاف قدر هائل من الموارد والجهود. وضآلة حجم آثار النظريات الأكثر جوهريةً على مدى النطاقات القابلة للملاحظة هي السبب وراء الصعوبة الهائلة التي تنطوي عليها الفيزياء حاليًّا. فإن أردنا إدراكَ آثار طبيعة المادة الأكثر جوهريةً وما بها من تفاعلات، علينا استكشاف النطاقات الأصغر حجمًا مباشَرةً أو إجراء قياسات أكثر دقة، ولا يمكننا الوصول إلى النطاقات البالغة الدقة أو الضخامة إلا باستخدام التكنولوجيا المتطورة؛ لذا يلزم علينا إجراء تجارب مُتقَنة — مثل التجارب التي تُجرَى في مصادم الهادرونات الكبير — لتحقيق التقدم في هذا العصر الذي نعيشه.

الفوتونات والضوء

تضرب قصة نظريات الضوء مثالًا واضحًا لكيفية استخدام النظريات الفعَّالة أثناء تطور العلم، مع طرح بعض الأفكار جانبًا والاحتفاظ بأفكار أخرى كقِيَم تقريبيةٍ بما يتلاءم مع نطاقاتها المحدَّدة. منذ عصر الإغريق، دُرِس الضوء باستخدام البصريات الهندسية، ويمثِّل ذلك أحدَ الموضوعات التي يخضع أي خريج طموح في مجال الفيزياء لاختبار فيها عند خوضه اختبار تقييم الخريجين؛ وهو الاختبار اللازم اجتيازه للقبول في الدراسات العليا. تفترض هذه النظرية أن الضوء ينتقل في صورة أشعة أو خطوط، وتوضِّح سلوك هذه الأشعة أثناء انتقالها عبر الوسائط المختلفة، وكيفية استخدام الآلات لها وكشفها عنها.

الغريب في الأمر أنه ما من أحد فعليًّا (على الأقل في هارفرد حيث أعمل بالتدريس الآن، وكنتُ طالبة يومًا ما) يدرس البصريات الهندسية والتقليدية. لعلها تُدرَّس قليلًا في المرحلة الثانوية، لكنها لا تمثِّل بالتأكيد جزءًا كبيرًا من المنهج.

البصريات الهندسية موضوع قديم شهد أوج فترات ازدهاره منذ عدة قرون، عندما ألَّفَ نيوتن كتابه الشهير «البصريات»، واستمر في العقد الأول من القرن التاسع عشر عندما قام ويليام روان هاميلتون بما يمكن اعتباره التنبؤ الرياضي الحقيقي الأول لظاهرة جديدة.

لا تزال نظرية البصريات التقليدية تنطبق على العديد من المجالات؛ مثل التصوير الفوتوغرافي، والطب، والهندسة، والفلك، إلى جانب استخدامها في تطوير ميكروسكوبات

وتليسكوبات ومرايا جديدة. ويستنبط مهندسو وعلماء البصريات التقليدية نماذجَ مختلفةً للظواهر الفيزيائية المتعددة، لكنهم في النهاية يطبقون البصريات فحسب، ولا يكتشفون قوانين جديدة.

تشرَّفْتُ، في عام ٢٠٠٩، بأن طُلِبَ مني إلقاء «محاضرة هاميلتون» في جامعة دبلن، وهي المحاضرة التي سبَقَني في إلقائها العديد من الزملاء المرموقين. والمحاضرة مسمَّاة بهذا الاسم تيمُّنًا بالسير ويليام روان هاميلتون، الفيزيائي والرياضي الأيرلندي الشهير الذي عاش في القرن التاسع عشر. وأعترف هنا أن اسم هاميلتون شديد الشيوع في الفيزياء، لدرجة أنني لم أربط — بحماقة مني — في البداية بين الاسم والشخص الحقيقي الأيرلندي الأصل. لكن ما أذهلني حقًّا هو ذلك القدر الكبير من جوانب الرياضيات والفيزياء التي أَحْدَثَ هاميلتون ثورةً فيها، بما في ذلك — على سبيل المثال لا الحصر — البصريات الهندسية.

والاحتفال بما يُسمَّى «يوم هاميلتون» مذهل حقًّا. وتشمل أنشطة هذا اليوم مسيرةً على شاطئ قناة «رويال كانال» في دبلن، حيث يتوقَّف جميعُ المشاركين في الاحتفال عند جسر «برووم» لمشاهدة أصغر عضو فيهم، وهو يكتب بعض المعادلات على الجسر الذي حفَرَ هاميلتون على جانبه منذ سنوات عديدة — في ذروة حماسه باكتشافاته — ما توصَّلَ إليه من أفكار. ولقد زرتُ المرصد الفلكي الجامعي في مدينة دانسينك حيث عاش هاميلتون، وتمكَّنْتُ من رؤية البَكر والبنية الخشبية للتليسكوب الذي يعود تاريخه إلى نحو قرنين من الزمان. كان هاميلتون قد وصل إلى هناك بعد تخرُّجه في كلية ترينيتي في عام ١٨٢٧، ونال منصب رئيس قسم الفلك ولقب الفلكي الملكي بأيرلندا. يتندَّر أهلُ البلد هناك على أنه بالرغم مما تمتَّعَ به هاميلتون من موهبة رياضية فذَّة، فلم تكن لديه معرفة صحيحة أو اهتمام بعلم الفلك، وبالرغم مما حقَّقَه من تطورات نظرية عديدة، ربما يكون قد أعاقَ تقدُّمَ علمِ الفلك الرصدي في أيرلندا لمدة خمسين عامًا.

مع ذلك، يقدِّم «يوم هاميلتون» التقديرَ للإنجازات العديدة التي حقَّقها ذلك العالِم النظري العظيم. وتشمل هذه الإنجازات التطورات في علمَيِ البصريات والديناميكا، وابتكار النظرية الرياضية للزمرة الرباعية (أو الكواتيرنيون؛ تعميم الأعداد المعقدة)، بالإضافة إلى البراهين المؤكَّدة على القوة التنبُّئية للرياضيات والعلوم. وتطوير الكواتيرنيونات لم يكن بالأمر الهين؛ فهي عنصر مهم في التفاضل الشعاعي الذي يمثِّل الأساسَ لدراستنا الرياضية لجميع الظواهر الثلاثية الأبعاد، هذا فضلًا عن استخدامنا

لها الآن في رسوم الكمبيوتر؛ ومن ثَمَّ في ألعاب الفيديو وصناعة الترفيه؛ ومن ثَمَّ كلُّ مَن يستمتع الآن بألعاب البلاي ستيشن أو الإكس بوكس يدين بالشكر لهاميلتون عن بعض المتعة التي ينعم بها.

من بين إسهامات هاميلتون المتعددة ذات الأهمية تحقيقُه تقدُّمًا في مجال البصريات. ففي عام ١٨٣٢، أثبت ذلك العالِم أن الضوءَ الذي يسقط بزاوية معينة على بلورة ما لها محوران مستقلان، ينكسر ليشكِّل مخروطًا مجوَّفًا من الأشعة المُنبعِثة، وتوصَّلَ بذلك إلى تنبؤات بشأن انكسار الضوء المخروطي الداخلي والخارجي عبر البلورة. وفي انتصار عظيم — ربما يكون الأول من نوعه — لعلم الرياضيات، أكَّدَ صديق هاميلتون وزميله، هامفري لويد، على صحة هذا التنبؤ، فالتصديق على تنبؤ رياضي لظاهرة لم تسبق رؤيتها من قبلُ كان له أهمية كبيرة، وكُرِّمَ هاميلتون على إنجازه.

وعند زيارتي لدبلن، وصف لي بفخر السكانُ المحليون هذا الاكتشاف الرياضي الذي استند فيه هاميلتون بشكل كامل إلى البصريات الهندسية. كان جاليليو أحد روَّاد التجارب وعلوم الرصد، وكان فرانسيس بيكون من أوائل مَن ناصَرُوا «العلم الاستقرائي» الذي يتم التنبؤ فيه بما سيحدث بناءً على حوادث سابقة. لكن من حيث استخدام الرياضيات في وصف ظاهرة لم يسبق حدوثها من قبلُ، ربما يُعَدُّ تنبُّؤ هاميلتون حول الانكسارِ المخروطيِّ الأولَ من نوعه على الإطلاق؛ ولهذا السبب على الأقل، لا يمكن تجاهُلُ إسهام هاميلتون في تاريخ العلم.

مع ذلك، ورغم أهمية اكتشاف هاميلتون، فلم تَعُدِ البصريات الهندسية التقليدية من موضوعات البحث؛ فجميع الظواهر المهمة تمَّ التوصُّل إليها منذ أمد بعيد. وبعد هاميلتون بفترة قصيرة، في ستينيات القرن التاسع عشر، قدَّم العالم الاسكتلندي، جيمس كلارك ماكسويل — وآخَرون — وصفًا كهرومغناطيسيًّا للضوء، لكن البصريات الهندسية — وإنْ كانَتْ تقريبيةً على نحوٍ جَلِيٍّ — هي وصف جيد للموجات ذات الطول الموجي القصير على نحو تصبح معه آثارُ التدخُّل غير ذات صلة، بحيث يتم التعامل مع الضوء كشعاع خطي. بعبارة أخرى، البصريات الهندسية نظرية فعَّالة، لكنها صالحة في إطار محدود فقط.

لا يعني ذلك الاحتفاظ بكل فكرة ظهرت على الإطلاق؛ فبعض الأفكار ثبت عدم صحتها، ومن الأمثلة على ذلك وَصْفُ إقليدس الأوليُّ للضوء الذي ادَّعَى فيه أن الضوء ينبعث من العينين، وهو الوصف الذي أعاد استخدامه الكِنديُّ في العالَمِ الإسلامي في

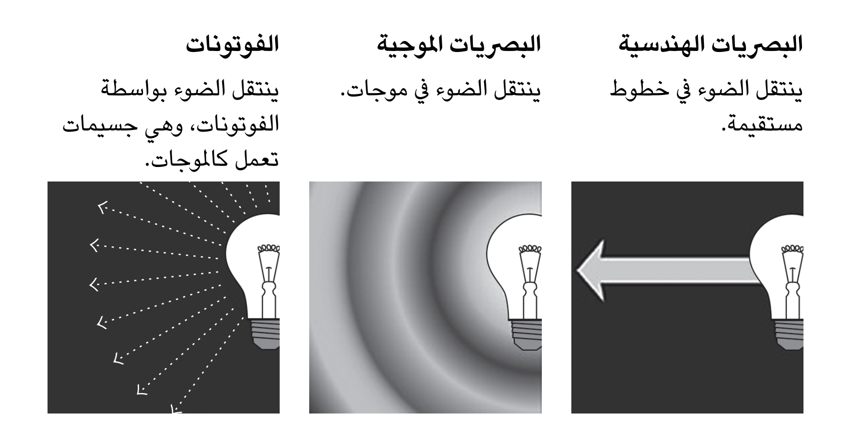
القرن التاسع. ورغم تقديم آخَرين — مثل عالم الرياضيات الفارسي ابن سهل — لوصف صحيح لظواهر أخرى، مثل الانكسار، بناءً على هذا الأساس الخاطئ، فإن نظرية إقليدس والكِنديِّ — التي تسبق العلم والمناهج العلمية الحديثة — كانت غير صحيحة؛ ومن ثَمَّ لم تستوعبها النظريات التالية لها، وغُضَّ الطرف عنها ببساطة.

لم يتكهَّنْ نيوتن بجانب مختلف لنظرية الضوء، وإنما طوَّر نظرية «الجسيمات» التي لم تتوافق مع نظرية الموجات الضوئية التي وضعها منافِسه روبرت هوك في عام ١٦٦٤، وكريستيان هويجنز في عام ١٦٩٠. واستمر الخلاف بينهم فترة طويلة من الزمان، وفي القرن التاسع عشر، أجرى كلٌّ من توماس يونج وأوجستين جان فرينل قياساتٍ لتداخل الضوء، ليقدِّما إثباتًا واضحًا على أن الضوء يتَّسِم بخصائص الموجات.

برهَنَتِ التطورات اللاحقة في نظرية الكم على أن نيوتن كان محقًّا على نحوٍ ما؛ إذ تنصُّ ميكانيكا الكم الآن على أن الضوء يتكوَّن بلا شك من جسيمات فردية تُسمَّى «الفوتونات»، وهي المسئولة عن توصيل القوة الكهرومغناطيسية. لكن النظرية الحديثة للفوتونات تقوم على كُموم الضوء، وهي الجسيمات الفردية التي يتكوَّن منها الضوء وتتسم بخاصية مميزة. والجسيم الفردي للضوء نفسه؛ أي الفوتون، ينهج نهج الموجة، وهذه الموجة تطرح إمكانية العثور على فوتون منفرد في أي منطقة في الفضاء (انظر الشكل ١-٥).

جاءت النظرية الجسيمية لنيوتن نتيجةً لدراسة البصريات، لكن الجسيمات التي تحدَّثَ عنها نيوتن — التي لا علاقة لطبيعتها بالموجات — ليست هي نفسها الفوتونات. وبقدر معرفتنا الآن، تُعَدُّ نظرية الفوتونات أكثرَ الأوصاف صحةً وجوهريةً للضوء، الذي يتكوَّن من جسيمات، يمكنها أن تتفق مع وصف الموجات. وتعبِّر ميكانيكا الكم عن وصفنا الأكثر جوهريةً الحالي لماهية الضوء وكيفية تصرفه، وهو وصف يتمتع بالصحة والقابلية للاستمرار في جوهره.

وميكانيكا الكم الآن من المجالات التي تُجرَى فيها أبحاث تفوق بكثير تلك التي تُجرَى في مجال البصريات. وإذا استمر الناس في التفكير في العلم الجديد باستخدام البصريات، فسيتناولون الآثارَ الجديدةَ له التي يمكن تطبيقها فقط مع ميكانيكا الكم؛ لذا فإن العلم المعاصر — وإن لم يَعُدْ يعمل على تطوير علم البصريات التقليدي — يتضمن بالفعل مجالًا لبصريات الكم يدرس الخصائصَ الميكانيكيةَ الكمية للضوء. فنجد الليزر يعتمد على ميكانيكا الكم، والأمر نفسه ينطبق على الكواشف الضوئية، مثل صمامات التضخيم الضوئي والخلايا الفولتية الضوئية التي تحوِّل ضوء الشمس إلى كهرباء.



شكل ١-٥: مهَّدَتْ كلٌّ من الموجات والبصريات الهندسية لفهمنا المعاصر للضوء، ولا تزال تسري في الظروف الملائمة.

يضم علم فيزياء الجسيمات الحديث أيضًا نظرية الديناميكا الكهربية الكمية التي وضعها ريتشارد فاينمان وآخَرون. وهذه النظرية لا تشتمل على ميكانيكا الكم فحسب، وإنما أيضًا النسبية الخاصة. ومن خلال الديناميكا الكهربية الكمية، ندرس الجسيمات الفردية التي تشمل الفوتونات — جسيمات الضوء — بالإضافة إلى الإلكترونات وغيرها من الجسيمات التي تحمل شحنة كهربية، ويمكننا فهم المعدلات التي تتفاعل وتتكون وتتدمر بها هذه الجسيمات. والديناميكا الكهربية الكمية هي إحدى النظريات التي تُستخدَم كثيرًا في فيزياء الجسيمات، ويرجع لها الفضل في أكثر التنبؤات المؤكدة دقةً في فيزياء الجسيمات. والديناميكا الكهربية الكمية مختلفة تمامًا عن البصريات الهندسية، لكن كليهما صحيح في مجاله المناسب.

يعكس كل مجال من مجالات الفيزياء فكرة النظرية الفعَّالة عمليًّا. فالعلم يتطوَّر عند ضمِّ الأفكار القديمة في النظريات الأكثر جوهرية، وتظل الأفكار القديمة سارية، ويمكن أن يكون لها تطبيقات عملية، لكنها لا تكون مجالًا رئيسيًّا للبحث. ورغم التركيز المُنصَبِّ في نهاية هذا الفصل على النموذج المحدَّد للتفسير الفيزيائي للضوء عبر العصور، فإن الفيزياء ككلٍّ تطوَّرَتْ بهذا الأسلوب. يتقدم العلم بشيء من عدم اليقين، لكنه يتسم بوجه عام بالمنهجية أثناء ذلك. والنظريات الفعَّالة في نطاق معين تتجاهل على نحو

صحيح الآثارَ التي يمكننا إثبات عدم إحداثها أي اختلاف في أي قياس بعينه. تستمر المعرفة والأساليب التي اكتسبناها في الماضي، لكن النظريات تتطوَّر مع تقدُّم فهمنا لمجموعة أكبر من المسافات والطاقات، وتمنحنا صورُ التقدُّم إدراكًا أكثر عمقًا للعوامل المسئولة بشكل أساسي عن الظواهر التي نراها.

واستيعاب هذا التقدُّم يساعدنا في التوصُّل إلى تفسير أفضل لطبيعة العلم، وتقدير بعض من الأسئلة الأساسية التي يطرحها الفيزيائيون (وغيرهم) الآن. وسنرى في الفصل التالي أن المنهجية الحالية — من نواحٍ عدة — قد بدأت في القرن السابع عشر.

الفصل الثاني

كشف الأسرار

إن الأساليب التي يتبعها العلماء حاليًّا هي التجسيد الأحدث لتاريخ طويل من القياسات والملاحظات التي تطوَّرت على مدار الزمن لتأكيد صحة الأفكار العلمية، أو استبعادها — على نحو مساوٍ في الأهمية. وهذه الحاجة إلى تجاوُز فهمنا الحدسي للعالم من أجل تحقيق التقدم في إدراكنا، تعكسها لغتُنا. فمصدر الفعل «يفكِّر» في اللغات الرومانسية — pensum — مأخوذ من فعل لاتيني معناه «يَزِن»، يشير ذلك إلى أن متحدِّثي اللغة الإنجليزية «يزِنون» الأفكار أيضًا.

والكثير من المدارك التكوينية التي مهَّدَتِ الطريق للعلم ليصل إلى شكله المعاصر تطوَّرتْ في إيطاليا في القرن السابع عشر، ولعب جاليليو دورًا رئيسيًّا في هذا التطور؛ فقد كان من أوائل مَن قدَّروا القياسات غير المباشرة — وهي القياسات التي تُجرَى باستخدام جهاز وسيط — وطوَّروها، بالإضافة إلى كونِه أول مَن صمَّم التجارب واستخدمها كوسيلة لإثبات صحة الحقائق العلمية، هذا فضلًا عن إدراكه التجارب الفكرية المجردة التي ساعدته في تشكيل أفكاره وصياغتها صياغةً مُتَّسِقة.

اطَّلَعْتُ على أفكار جاليليو العديدة التي أحدثت تغييرًا جوهريًّا في العلم، وذلك عند زيارتي لمدينة بادوا في ربيع عام ٢٠٠٩. دفعني لهذه الزيارة حضور مؤتمر عن الفيزياء نظَّمَه أستاذ الفيزياء، فابيو زويرنر، أحد أبناء هذه المدينة. كان من الدوافع الأخرى كذلك الحصول على درجة «مواطنة شرفية» لهذه المدينة. سعدتُ في تلك الزيارة بالالتقاء بزملائي الفيزيائيين الذين جاءوا لحضور المؤتمر، بالإضافة إلى المجموعة الموقَّرة من «المواطنين» الآخَرين، ومن بينهم الفيزيائيون ستيفن واينبرج، وستيفن هوكينج، وإد ويتن. وفوق كل ذلك، سنحت لي الفرصة جَنْي بعض المعرفة عن تاريخ العلم.

جاءت زيارتي في توقيت ممتاز؛ إذ وافَقَ عام ٢٠٠٩ الذكرى السنوية الأربعمائة لعمليات الرصد السماوية الأولى التي أجراها جاليليو. وكان مواطنو بادوا مَعْنيِّين بوجه خاص بهذا الشأن؛ نظرًا لأن جاليليو كان يُلقِي المحاضرات في الجامعة الموجودة في تلك المدينة أثناء فترة إجرائه لأبحاثه المهمة. ولإحياء ذكرى عمليات رصده الشهيرة، نظَّمت مدينة بادوا (وكذلك بيزا، وفلورنسا، والبندقية — وهي المدن الأخرى التي لعبت دورًا هامًّا في حياة جاليليو العلمية) عروضًا وفعاليات على شرفه. وجرت المناقشات حول الفيزياء في قاعة بمركز ألتيناتى الثقافي (أو سان جايتانو)، وهو المبنى نفسه الذي استضاف المعرض المذهل الذي احتفى بالإنجازات العديدة الملموسة لجاليليو، وألقى بالضوء على الدور الذي لعبه هذا العالِم في تغيير معنى العلم اليوم وتحديده.

أظهر معظم مَن قابلتُهم تقديرًا لإنجازات جاليليو، وحماسًا للتطورات العلمية المعاصرة. وقد أذهل الجميعَ — بما في ذلك الفيزيائيون المحليون — ما أبداه عمدةُ مدينة بادوا، فلافيو زانوناتو، من اهتمام ومعرفة. فهو لم يشترك فحسب في المناقشات العلمية التي جرت على مأدبة العشاء التي أقيمت بعد المحاضرة العامة التي ألقيتُها، وإنما فاجَأ الحضور كذلك أثناء المحاضرة نفسها بسؤال ذكي عن تدفُّق الشحنات في مصادم الهادرونات الكبير.

وكجزءٍ من مراسم مَنْحِي درجةَ المواطنة الشرفية، قدَّمَ لي العمدةُ مفتاحَ المدينة. كان مفتاحًا مذهلًا يرقى لما توقَّعته بناءً على ما شاهدته في الأفلام السينمائية. كان كبيرًا فضيَّ اللون ذا نقوش جميلة، ما دفع أحد زملائي للتساؤل عمَّا إذا كان مأخوذًا من إحدى قصص «هاري بوتر»، لكنه كان مفتاحًا للمراسم؛ أي إنه لا يفتح أي شيء، لكنه مع ذلك كان رمزًا جميلًا للدخول — إلى المدينة بالطبع — لكنني تخيَّلتُه مفتاحًا للدخول من باب معرفي ثري وزاخر.

بالإضافة إلى ذلك المفتاح، قدَّمَتْ لي ماسيميلا بالدو سيولين، الأستاذة بجامعة بادوا، ميدالية تذكارية من مدينة البندقية تُعرَف باسم «أوزيلا»، محفورًا عليها عبارة مقتبسة عن جاليليو، وهي العبارة المعروضة بقسم الفيزياء في الجامعة أيضًا. ترجمة هذه العبارة هي: «أرى أنه من الأهم التوصُّل إلى حقيقةٍ ما بشأن أي شيء — مهما كان بسيطًا — بدلًا من الدخول في جدالات طويلة بشأن أهم الأسئلة دون التوصُّل إلى أي حقيقة.»

أَطْلَعْتُ الكثيرَ من الزملاء في المؤتمر على هذه الكلمات؛ إذ إنها في الواقع مبدأٌ إرشاديٌّ قائمٌ حتى يومنا هذا. فصور التقدم الإبداعي تظهر مصحوبة عادةً بمشكلات يمكن تعقُّبها، وهو الموضوع الذي سنعود لتناوله لاحقًا. وليست جميع الأسئلة التي نجيب عنها تؤدي إلى نتائج جذرية مباشرة، لكن صور التقدم — حتى تلك التي تبدو متزايدة — تؤدي أحيانًا إلى تحوُّلات مهمة في فهمنا.

يوضِّح هذا الفصل كيف أن عمليات الرصد الحالية التي يتناولها هذا الكتاب ترجع أصولها إلى التطورات التي شهدها القرن السابع عشر، وكيف أن صورَ التقدُّم الأساسية آنذاك ساعدَتْ في تحديد طبيعة النظرية والتجربة اللتين نوظِّفهما الآن. فالأسئلة المهمة لا تزال — من بعض النواحي — هي نفسها الأسئلة التي ما برح العلماء يطرحونها طيلة ٤٠٠ عام، لكن نظرًا للتطورات النظرية والتكنولوجية، شهدت الأسئلة البسيطة التي نطرحها الآن تطوُّرًا هائلًا.

إسهامات جاليليو العلمية

يَطرُق العلماء على «أبواب السماء» في محاولة منهم لتجاوز الحد الفاصل بين المعلوم والمجهول، فيبدأ العلماء عملهم دومًا بمجموعة من القواعد والمعادلات التي تتنبَّأ بالظواهر التي يمكنهم قياسها حاليًّا، لكنهم يحاولون دائمًا خوض غمار أنظمة جديدة لم يتمكَّنوا من استكشافها من قبلُ بواسطة التجارب. وباستخدام التكنولوجيا والرياضيات، يتناول العلماء على نحو منهجي الأسئلةَ التي لم تتخطَّ في الماضي كَوْنَها افتراضًا أو مُعتقَدًا فحسب. ومن خلال الملاحظات الأعلى جودةً والأكثر عددًا، وأُطُرِ العمل النظرية المُحسَّنة التي تضم قياسات أحدث، يتوصَّل العلماء إلى فهمٍ أكثر شمولًا للعالم.

وقد تمكَّنْتُ من التوصُّل إلى فهم أفضل للدور الذي لعبه جاليليو في تطوير هذا النوع من التفكير أثناء استكشافي لمدينة بادوا ومعالمها التاريخية، من أكثر هذه المعالم شهرة كنيسة سكروفيني، وهي الكنيسة التي تضم صور جوتو الجدارية التي يعود تاريخها إلى مطلع القرن الرابع عشر. تتمتع هذه اللوحات بشهرة واسعة لأسباب عدة، لكن في نظر العلماء اللوحة الشديدة الواقعية التي توضِّح ظهور المُذنَّب هالي عام ١٣٠١ (فوق مشهد «تعبُّد المجوس ليسوع الطفل») هي أكثر هذه اللوحات إعجازًا (انظر الشكل ٢-١). لقد كان المذنب مرئيًّا للعين المجردة في الوقت الذي رُسِمت فيه اللوحة.



شكل ٢-١: رسم جوتو هذه اللوحة الموجودة في كنيسة سكروفيني في مطلع القرن الرابع عشر عندما كان مُذنَّب هالي مرئيًّا للعين المجردة.

بالرغم من ذلك، لم تكن تلك الصور صحيحة علميًّا. أشارت المرشدة السياحية، التي رافقتني في جولتي، إلى صورة لبعض النجوم في قاعة مدينة بادوا «بلاتزو ديلا راجيوني» التي يعود تاريخها إلى العصور الوسطى، وأوضحت لي أنه قيل لها إنها صورة لدرب التبانة، وأردفت قائلةً إن مرشدًا آخَر أكثر خبرةً أوضح لها فيما بعدُ الخطأَ التاريخيَّ الذي ينطوي عليه هذا التفسير؛ ففي وقت رسم تلك اللوحة، كان الناس يعبِّرون عمَّا يرونه فحسب. ولعل ما تعكسه اللوحة هو سماء مليئة بالنجوم، لكن المهم في الأمر هو أنها لا علاقةَ لها على الإطلاق بأي شيء على درجة التعقيد التي تتسم بها مجرتنا. فالعلم — كما نعرفه الآن — لم يكن قد ظهر بعدُ آنذاك.

قبل جاليليو، اعتمد العلم على الملاحظات المباشرة والتفكير الخالص، وكان العلم الأرسطي نموذجًا للأسلوب الذي حاوَلَ الناس فهْمَ العالَم من خلاله، فكان من الممكن

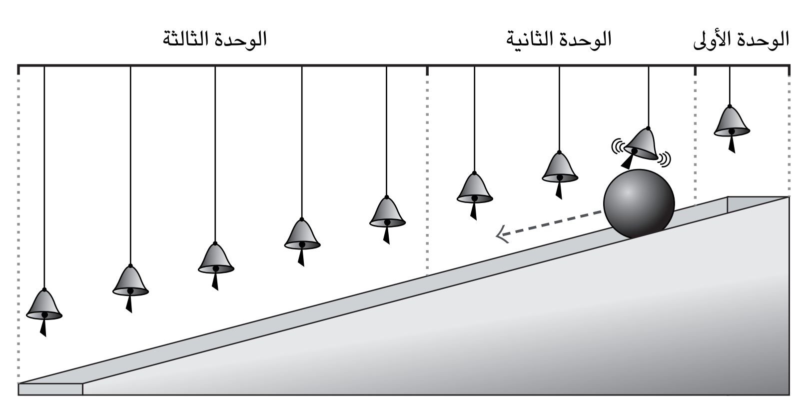
استخدام الرياضيات في عمليات الاستدلال، لكن الافتراضات الأساسية كانت تقوم على المعتقدات أو ما يتفق مع الملاحظات المباشِرة.

رفَضَ جاليليو بوضوح الاستنادَ في أبحاثه إلى «عالَم من الأوراق»، وإنما أراد قراءة «كتاب الطبيعة» ودراسته. ولتحقيق هذا الهدف، غيَّرَ منهجية الملاحظة، وأقَرَّ بأهمية التجارب. لقد فهم جاليليو كيفية تصميم هذه المواقف المصطنعة واستخدامها لإجراء عمليات الاستدلال بشأن طبيعة القانون الفيزيائي، وباستخدام التجارب، تمكَّنَ جاليليو من اختبار الفرضيات المتعلقة بقوانين الطبيعة؛ ومن ثَمَّ كان بمقدوره إثباتها، أو دحضها (وهو الأمر الأهم).

تضمَّنت بعض تجاربه أسطحًا مائلة؛ وهي الأسطح المستوية المائلة التي توجد في جميع اختبارات الفيزياء التمهيدية، الأمر الذي قد يمثِّل إزعاجًا بشكلٍ ما. لم تكن الأسطح المائلة عند جاليليو مسألةً مصطنَعةً خاصة بالفصول الدراسية، مثلما تبدو أحيانًا في نظر طلاب الفيزياء في المرحلة التمهيدية، وإنما كانت وسيلة لدراسة سرعة الأجسام الهابطة عن طريق مدِّ انحدار الأجسام لمسافة أفقية، كي يتمكَّنَ من إجراء قياسات دقيقة لكيفية «سقوطها». استخدم جاليليو كرونومترًا مائيًّا لقياس الزمن، لكنه أضاف أيضًا ببراعة أجراسًا عند نقاط معينة ليتمكَّنَ من استغلال أُذُنه الموسيقية لسماع صوت هذه الأجراس وحساب سرعة سقوط الكرة، كما هو موضَّح في الشكل ٢-٢. ومن خلال هذه التجربة، وغيرها من التجارب الأخرى التي تناولت الحركة والجاذبية، وضع جاليليو ويوهانز كبلر ورينيه ديكارت الأساس للقوانين الميكانيكية الكلاسيكية التي اشتهر إسحاق نيوتن بتطويرها.

تجاوَزَ جاليليو أيضًا في علمه ما كان بوسعه ملاحظته، فصمَّم تجارب فكرية — أي أفكارًا مجردة قائمة على ما كان يراه بالفعل — للوصول إلى تنبُّؤات تنطبق على تجارب ما كان بإمكان أحدٍ آنذاك إجراؤها فعليًّا. ولعل أشهر تنبؤاته ذلك التنبؤ بأن الأجسام — في غياب المقاومة — تسقط جميعها بالمعدل ذاته، وبالرغم من عدم تمكُّنِه من تصميم الموقف المثالي لذلك، فقد تنبَّأ بما سيحدث. أدرك جاليليو دور الجاذبية في سقوط الأشياء نحو الأرض، لكنه علم أيضًا أن مقاومة الهواء تقلِّل من سرعتها في الهبوط. والعلم السليم هو الذي يشمل فهمًا لجميع العوامل التي قد تتدخل في عملية القياس، وقد ساعدته التجارب الفكرية والتجارب الفيزيائية الفعلية في تحسين فهمه لطبيعة الجاذبية.

وفي مصادفة تاريخية عجيبة، وُلِد نيوتن — أحد أعظم الفيزيائيين الذين اتبعوا هذا النهج العلمي — في نفس العام الذي توفي فيه جاليليو (أشار ستيفن هوكينج في أحد



شكل ٢-٢: قاس جاليليو سرعة هبوط الكرات على سطح مائل، مستعينًا بالأجراس لتسجيل مسارها.

أحاديثه إلى سعادته بأن مولده جاء بعد ثلاثة قرون بالضبط من هذا التاريخ). ولا يزال العلماء يتبعون حتى الآن نهج تصميم التجارب الفكرية أو الفيزيائية، وتفسيرها، وفهم حدودها، بغض النظر عن عام ميلادهم. والتجارب الحالية أدق، وتعتمد على تكنولوجيا أكثر تقدُّمًا بكثير مقارنةً بتلك الأيام، لكن فكرة تصميم جهاز لإثبات صحة التنبؤات المُستمَدَّة من الفرضيات، أو استبعادها، لا تزال سمةً مميزة للعلم ومناهجه في أبحاث العصر الحالي.

بالإضافة إلى التجارب — المواقف المصطنعة التي صمَّمها جاليليو لاختبار صحة الفرضيات — كان من الإسهامات العلمية الأخرى لهذا العالِم التي أحدثت تغييرًا جذريًّا؛ إدراكُ قدرة التكنولوجيا على تطوير ملاحظاتنا للكون كما يظهر أمامنا، وتطوير هذه القدرة. فبواسطة التجارب، تجاوَزَ جاليليو نطاق التفكير المجرد الخالص، وباستخدام الأجهزة الجديدة تجاوز الملاحظات غير المنتقاة.

اعتمدت أغلب الأعمال العلمية في السابق على الملاحظات المباشرة دون وسيط، فكان الناس يلمسون الأجسام أو يرونها باستخدام حواسهم، وليس باستخدام جهاز وسيط يغيِّر من الصور بشكلٍ ما. فنجد أن تيكو براهي (وهو مَن اكتشف من بين أشياء

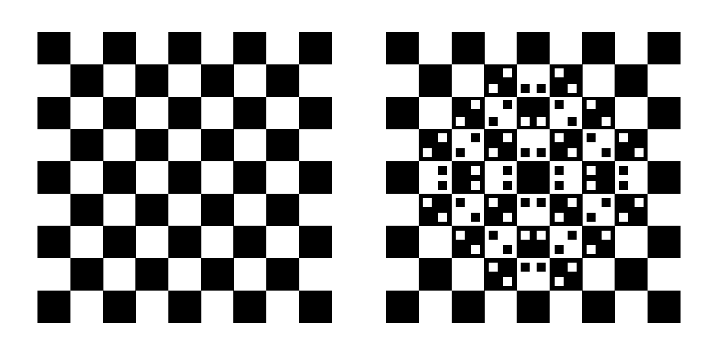
أخرى عديدة مُستعرًا أعظم وقاسَ بدقة مدارات الكواكب) قد أجرى أشهر الملاحظات الفلكية قبل ظهور جاليليو، واستخدم تيكو بالفعل آلات القياس الدقيقة، مثل الربعيات والسدسيات والكرات ذات الحلق، بل تولَّى أيضًا تصميم آلات تفوق دقتها ما استخدمه أي شخص آخَر من قبلُ، ودفع المال مقابل إنشائها؛ ما نتج عنه قياسات كانت على درجة من الدقة تسمح لكبلر بالاستدلال على المدارات الإهليلجية. ومع ذلك، فقد أجرى تيكو جميع قياساته من خلال الملاحظات الدقيقة بعينيه المجردتين دون أي عدسة وسيطة أو أي جهاز آخَر.

من الجدير بالملاحظة أيضًا أن جاليليو كان يتمتع بعين فنية مُحنَّكة وأُذُن موسيقية بارعة؛ فهو في النهاية ابن عوَّاد ومنظِّر موسيقي، لكنه مع ذلك أدرك أن الملاحظات التي يستعين فيها بالتكنولوجيا كوسيط يمكن أن تُحسِّن من القدرات المذهلة التي يتمتع بها بالفعل. وقد وثق جاليليو في أن القياسات غير المباشرة التي يمكنه إجراؤها بواسطة أدوات الملاحظة في كلٍّ من النطاقات الكبيرة والصغيرة؛ يمكن أن تتجاوز بكثير الملاحظات التي تُجرَى بواسطة قدراته المجردة دون مساعدة.

ويُعَدُّ استخدام التليسكوبات لاستكشاف النجوم أشهر تطبيق تكنولوجي أجراه جاليليو؛ فاستخدامه لهذه الآلة غيَّرَ من كيفية ممارستنا للعلم، وتفكيرنا في الكَوْن، ورؤيتنا لأنفسنا. لم يخترع جاليليو التليسكوب، وإنما يعود الفضل في ابتكاره إلى هانز ليبرشي في هولندا ١٦٠٨، لكن هانز استخدمه في التجسُّس على الآخَرين، ومن هنا جاء اسمه البديل «النظارة المُقرِّبة». مع ذلك، فإن جاليليو كان من أوائل مَن أدركوا القدرة المحتملة لهذا الجهاز في إجراء ملاحظات في النظام الكوني لا يمكن إجراؤها باستخدام العين المجردة، وطوَّرَ تلك النظارة المُقرِّبة التي ابتُكِرت في هولندا عن طريق تصميم تليسكوب قادر على تكبير الأحجام بمقدار عشرين مرة، وفي خلال عام من عمله على هذه اللعبة المُستخدَمة آنذاك في المهرجانات، حوَّلها جاليليو إلى آلة علمية.

كانت استعانة جاليليو بأدوات وسيطة في الملاحظة نقطة تحول من أساليب القياس القديمة وأحد أساسات التقدم الرئيسية في جميع العلوم الحديثة. ارتاب الناس في بادئ الأمر من هذه الملاحظة غير المباشرة، بل إن البعض يرتابون في عصرنا الحالي من حقيقة الملاحظات التي تُجرَى باستخدام مصادمات البروتونات الكبيرة، أو البيانات التي تسجِّلها أجهزة الكمبيوتر الموجودة في الأقمار الصناعية أو التليسكوبات، لكن البيانات الرقمية التي تسجِّلها هذه الأجهزة لا تقل واقعيةً عن أي شيء نلاحظه بشكل مباشرٍ، بل تكون

أكثر دقةً في العديد من النواحي أيضًا. ففي النهاية، يحدث السمع لدينا نتيجة لتذبذبات الهواء عند اصطدامه بطبلة الأذن، والرؤية نتيجة لاصطدام الموجات الكهرومغناطيسية بشبكية العين ثم معالجة عقولنا لها، ويعني ذلك أن أجسامنا هي صورة من صور التكنولوجيا أيضًا، لكن لا يمكن الاعتماد عليها بشكل كبير في هذا الشأن، وهو ما يمكن أن يقِرَّ به أي شخص مرَّ بتجربة وهم بصري من قبلُ (انظر الشكل ٢-٣ للاطلاع على مثال). يكمن جمال القياسات العلمية في إمكانية استدلالنا بوضوح على جوانب الحقيقة الفيزيائية — بما في ذلك طبيعة الجسيمات الأولية وخصائصها — من خلال التجارب، مثل تلك التي يُجرِيها الفيزيائيون الآن باستخدام كواشف دقيقة وكبيرة.



شكل ٢-٣: ليست أعيننا دومًا الوسيلة الأكثر موثوقيةً في التأكُّد من الحقائق الخارجية. رقعتا الشطرنج الموضحتان في هذا الشكل متماثلتان، لكن النقاط في الرقعة الموجودة على اليمين تجعل المربعات تبدو مختلفة.

بالرغم من أن فطرتنا قد تملي علينا أن الملاحظات التي نُجرِيها بأعيننا دون مساعدة هي الأكثر موثوقيةً، وأنه علينا الارتياب في التجريد؛ ينصحنا العلم بضرورة التسامي فوق كل هذه النزعات البشرية. فالقياسات التي نجريها باستخدام الآلات التي نصمِّمها أكثر موثوقيةً من أعيننا المجردة، ويمكن تحسينها والتيقُّن من صحتها عن طريق التكرار.

شهد عام ١٦١١ قبول الكنيسة للرأي المتطرف آنذاك القائل بأن القياسات غير المباشرة صحيحة، ويروي توم ليفنسون في كتابه «الصاع بالصاع»[1] أن المؤسسة العلمية

بالكنيسة لزم عليها اتخاذ قرار بشأن ما إذا كانت الملاحظات التي تُجرَى باستخدام التليسكوب جديرة بالثقة أم لا، وضغط الكاردينال روبرت بيلارمين على علماء الكنيسة لاتخاذ هذا القرار. وفي يوم ٢٤ مارس من عام ١٦١١، توصَّلَ علماء الرياضيات الأربعة الرئيسيون في الكنيسة إلى أن اكتشافات جاليليو جميعها صحيحة، وأن التليسكوب ساهَمَ في التوصُّل إلى ملاحظات موثوقة ودقيقة بلا شك.

ثمَّةَ ميدالية نحاسية تذكارية أخرى عرضها عليَّ أهالي بادوا، وهي الميدالية التي لخَّصَتْ على نحو جميل أهميةَ إنجازات جاليليو. تظهر على أحد جانبي هذه الميدالية صورة لتقديم التليسكوب إلى حكومة جمهورية البندقية والقائد ليوناردو دونا في عام ١٦٠٩، أما الجانب الآخَر، فنُقِشَت عليه ملاحظة بأن ذلك الحدث كان بمنزلة «ميلادٍ حقيقيٍّ للتليسكوب الفلكي المعاصر»، ونقطة البداية «للثورة التي شهدها الإدراك البشري للعالم بعيدًا عن كوكب الأرض»، و«لحظة تاريخية تتجاوز حدود علم الفلك، ما يجعلها إحدى نقاط البداية في العلم المعاصر.»

أدَّتْ مزايا الرصد الذي أجراه جاليليو إلى فيض من الاكتشافات اللاحقة. ومرة أخرى، عندما استكشف جاليليو النظام الكوني، توصَّلَ إلى أجرام جديدة خارج نطاق ما يمكن ملاحظته بالعين المجردة؛ فعثَرَ على نجوم في الثريا وبأرجاء السماء لم يَرَها أحدٌ من قبلُ، متناثِرةٍ بين النجوم الأكثر سطوعًا التي كانت معروفة بالفعل. ونشر جاليليو اكتشافاته في كتابه الشهير «رسول النجوم» عام ١٦١٠ الذي سارع إلى إنهاء تأليفه في حوالي ستة أسابيع، فكان يُجرِي أبحاثه على عجل بينما كان الكتاب تحت الطباعة، تلهُّفًا منه لإبهار كوزيمو الثاني دي ميديتشي، الدوق الأعظم لتوسكانا — وابن أكثر عائلات إيطاليا ثراءً — والحصول على دعمه قبل أن يسبقه أي شخص آخَر يعمل باستخدام التليسكوب في نشر هذه الاكتشافات.

وبفضل ملاحظات جاليليو الدقيقة، حدث تطوُّر هائل في الفهم؛ فقد طرح ذلك العالِم سؤالًا مختلفًا، وهو: «كيف؟» بدلًا من «لماذا؟» وبطبيعة الحال قد قادته الاكتشافات المُفصَّلة التي لم يتمكَّن من التوصُّل إليها إلا باستخدام التليسكوب إلى الاستنتاجات التي أغضبت الفاتيكان آنذاك. فاستنادًا إلى ملاحظات معيَّنة، اقتنَعَ جاليليو بأن كوبرنيكوس كان محقًّا، وكانت الرؤية العالمية الوحيدة في نظره التي يمكنها دومًا تفسير جميع ملاحظاته، تعتمد على علم كونيات ينصُّ على أن الشمس — وليس الأرض — هي التي تقع في مركز المجرة وتدور حولها جميع الكواكب.

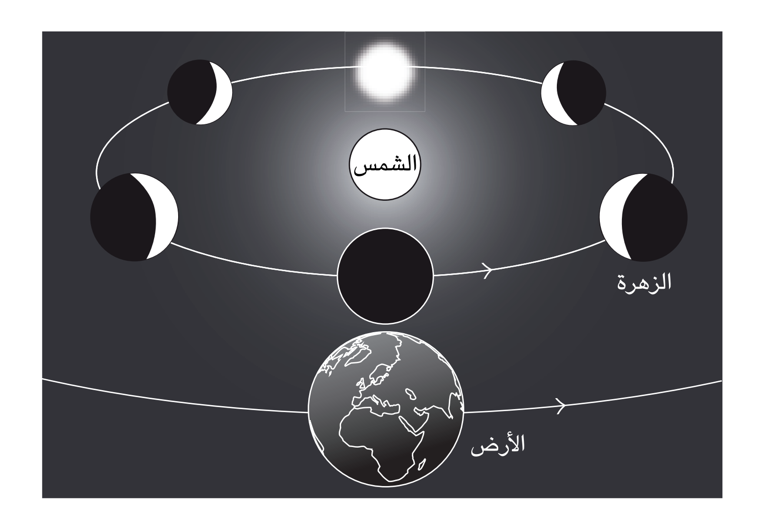
كانت أقمار كوكب المشتري إحدى أهم تلك الملاحظات؛ تمكَّنَ جاليليو من رؤية هذه الأقمار عند ظهورها واختفائها وتحرُّكها في مداراتها حول ذلك الكوكب الضخم. قبل هذا الاكتشاف، بدت الأرضُ الثابتة الطريقةَ الوحيدة والواضحة لتفسير مدار القمر الثابت، واكتشاف أقمار المشتري عنى أن لذلك الكوكب أجسامًا سيَّارة حوله أيضًا رغم تحرُّكه، وقد أعطى ذلك مصداقيةً لإمكانية تحرُّك الأرض أيضًا، بل دورانها أيضًا حول جسم مركزي منفصل، وهي الظاهرة التي لم تُفسَّر إلا لاحقًا عندما وضع نيوتن نظريته عن الجاذبية، وما تنبَّأَتْ به هذه النظرية من انجذاب متبادَل بين الأجرام السماوية.

أطلق جاليليو على أقمار كوكب المشتري «النجوم الميديتشية» تكريمًا لكوزيمو الثاني دي ميديتشي؛ ما يثبت إدراك جاليليو لأهمية التمويل الذي يُعَدُّ أحد الجوانب الأساسية للعلم المعاصر؛ وقرَّرت عائلة ميديتشي بالتأكيد دعم أبحاث جاليليو. بَيْدَ أنه لاحقًا، وبعد حصول جاليليو على تمويل مدى الحياة من مدينة فلورنسا، سُمِّيَتِ الأقمارُ «أقمارَ جاليليو» تكريمًا له لاكتشافه إياها.

استخدم جاليليو كذلك التليسكوب لرصد التلال والأودية الموجودة على القمر، وقبل ما توصَّلَ إليه ذلك العالِم من اكتشافات، كان يُعتقَد أن السماوات لا تتغير أبدًا؛ إذ يحكمها ثبات وانتظام مطلق. ونصَّتْ وجهة النظر الأرسطية أنه في حين يتسم كل شيء بين القمر والأرض بالنقص وعدم الثبات، فإن الأجرام السماوية التي تتجاوز حدود كوكبنا تتسم بالثبات والكروية؛ فهي ذات جوهر رباني. وكانت النيازك والمُذنَّبات تُعتبَر ظواهر جوية، مثل السحب والرياح، لكن جاءت ملاحظات جاليليو المُفصَّلة لتشير إلى أن عدم الكمال يمتدُّ إلى ما يفوق النطاق البشري والأرضي. لم يكن القمر جسمًا كرويًّا منبسطًا، بل كان في الواقع أشبه بالأرض على نحو يفوق ما قد يفترضه أي أحد، ومع اكتشاف الطوبوغرافيا المعقَّدَة للقمر، أعيد النظر في فكرة تقسيم الأجسام إلى أرضية وسماوية؛ فلم تَعُدِ الأرض بذلك جسمًا فريدًا من نوعه، وإنما بدت جرمًا سماويًّا شأنها شأن الأجرام السماوية الأخرى.

أوضح لي المؤرخ الفني جوزيف كورنر أن خلفية جاليليو الفنية كانت من أسباب تمكنُّه من استخدام الضوء والظلال في التعرُّف على الحُفَر التي تُحدِثها النيازك عند سقوطها من السماء، وقد ساعَدَه التدريب المنظوري في فهم ما كان يراه من مشاهد؛ فأدرك على الفور المعاني الضمنية لها، رغم أنها لم تكن ثلاثية الأبعاد بالكامل. لم يهتم جاليليو برسم خريطة للقمر، وإنما بفهم تركيبه، وقد فَهِمَ على الفور ما كان يراه.

يعرض الشكل ٢-٤ المجموعة الثالثة من الملاحظات المهمة التي أثبتت صحة وجهة نظر كوبرنيكوس المتعلقة بأطوار كوكب الزهرة. كانت لهذه الملاحظات أهمية خاصة في إثبات دوران الأجرام السماوية حول الشمس، واتضح بذلك أن الأرض ليست فريدة على أي نحو مميز، وأن كوكب الزهرة لا يدور حولها.



شكل ٢-٤: ملاحظة جاليليو لأطوار كوكب الزهرة أثبتَتْ حتمية دورانه حول الشمس، ما يدحض نظام بطليموس الفلكي.

من المنظور الفلكي، لم تحظَ الأرضُ بأهمية مميزة؛ فالكواكب الأخرى تدور أيضًا حول الشمس، وتدور حولها أجرام سيَّارة بدورها، بالإضافة إلى ذلك، خارج حدود الأرض — التي عبثَتْ بها يد الإنسان بشكل جَلِيٍّ — لا يتسم كل شيء بالكمال التام، بل إن الشمس ذاتها تشوبها بُقَعٌ شمسية رصدها جاليليو أيضًا.

مُتسلِّحًا بهذه الملاحظات، توصَّل جاليليو إلى استنتاجه الشهير بأن الأرض ليست مركز الكون، وأنها تدور حول الشمس؛ ليست الأرض النقطة المركزية. وسجَّلَ جاليليو هذه الاستنتاجات الثورية، ليقف بذلك في وجه الكنيسة، لكنه ادَّعَى بعد ذلك رفضه لأفكار كوبرنيكوس ليخفِّف العقابَ الذي فُرِض عليه إلى حبس بالمنزل.

لم يتوقف دور جاليليو عند هذه الملاحظات والنظريات المتعلقة بالنطاقات الكبيرة للكون، وإنما أحدث ذلك العالِم كذلك تغييرًا جذريًّا في قدرتنا على إدراك النطاقات الصغيرة؛ فقد أدرك أن الأدوات الوسيطة يمكن أن تكشف عن الظواهر في النطاقات الصغيرة، مثلما تفعل ذلك في النطاقات الكبيرة بالضبط، وطوَّر المعرفة العلمية في هذين الجانبين. وبالإضافة إلى أبحاثه الفلكية الشهيرة (الشائنة آنذاك)، فقد بدَّل مسار التكنولوجيا إلى الداخل؛ أي إلى دراسة العالم المجهري.

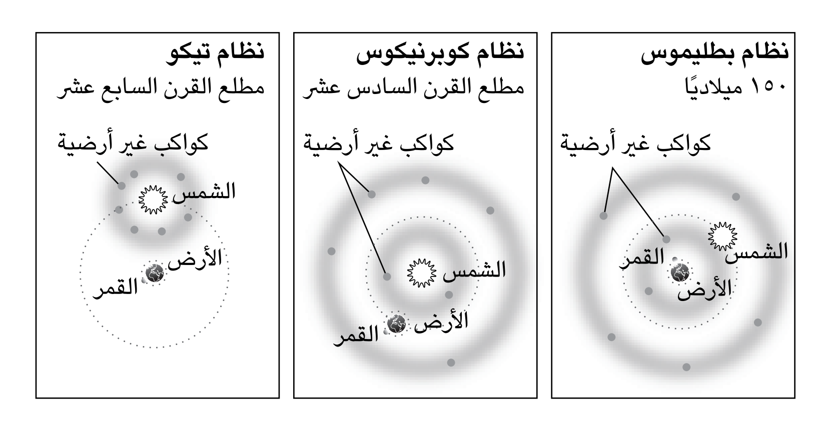
أصابني شيء من الدهشة عندما قال لي ميشيل دورو — وهو فيزيائي إيطالي شاب أرشَدَني خلال زيارتي لمعرض سان جايتانو في مدينة بادوا — دون تردُّد إن جاليليو هو مخترع المجهر. يمكنني القول هنا إن خارج إيطاليا، على الأقل، ثمَّةَ إجماع على أن المجهر قد اختُرِع في هولندا، لكن ليس معروفًا بالضبط ما إذا كان المخترع هو هانز ليبرشي أم زخارياس يانسن (أو والده). وسواء أكان جاليليو قد اخترع التليسكوب أم لا (وعلى الأرجح أنه لم يفعل)، فالحقيقة أنه صمَّمَ بالفعل مجهرًا واستخدمه في ملاحظة النطاقات الأصغر حجمًا، وقد أمكن استخدام هذا الاختراع لملاحظة الحشرات بدرجات من الدقة لم تكن ممكنة من قبلُ. وفي الخطاب الذي بعث به جاليليو إلى أصدقاء وعلماء آخرين، كان أول مَن كتب عن المجهر وإمكاناته. وقد احتوى معرض سان جايتانو على أول مؤلَّف يتناول الملاحظات المنهجية التي يمكن إجراؤها باستخدام مجهر جاليليو، ويعود تاريخ هذا المؤلَّف إلى عام ١٦٣٠، ويعرض الدراسات المُفصَّلة التي أجراها فرانسيسكو ستيلوتي على النحل.

يوضِّح المعرض لزوَّاره أيضًا كيف درس جاليليو العظام، واكتشف حتمية اختلاف خصائصها باختلاف حجمها. من الجليِّ هنا أنه بالإضافة إلى مدارك جاليليو العديدة، كان لديه وعي شديد بأهمية النطاق.

لم يَدَعِ المعرضُ مجالًا للشك بشأن إدراك جاليليو الكامل لمناهج العلم وأهدافه؛ أي إطار العمل المفاهيمي والتنبُّئي والكمي الذي يحاول وصف أجسام محدَّدة ويعمل وفق قواعد دقيقة، فما أن تُقدِّم هذه القواعد تنبؤات تم اختبارها جيدًا بشأن العالَم، حتى يمكن استخدامها للتنبؤ بالظواهر المستقبلية. فالعلم يبحث عن التفسير الأشد اختصارًا الذي من شأنه تعليل جميع الملاحظات والتنبؤ بها.

تعكس قصة ثورة كوبرنيكوس هذه النقطة جيدًا أيضًا؛ ففي عهد جاليليو، توصَّل تيكو براهي، عالم الفلك الرصدي العظيم، إلى نتيجة مختلفة — وخاطئة في الوقت نفسه

— بشأن طبيعة النظام الشمسي، فدعم فكرة غريبة تجمع بين نظام بطليموس من ناحية مركزية الأرض، ونظام كوبرنيكوس من ناحية دوران الكواكب حول الشمس (انظر الشكل ٢-٥ للاطلاع على مقارنة بين هذه الأنظمة). اتفقت فكرة تيكو عن الكون مع الملاحظات، لكنها لم تكن أكثر التفسيرات دقةً، ومع ذلك فقد كانت أكثر إرضاءً لليسوعيين مقارنةً بوجهة نظر جاليليو؛ وذلك لأنه وفقًا لتيكو — في الجانب الذي يتفق فيه مع نظرية بطليموس التي عارضتها ملاحظات جاليليو — الأرض ثابتة لا تتحرك.[2]



شكل ٢-٥: ثلاثة مقترحات لوصف الكون: افترض بطليموس أن الشمس والقمر وجميع الكواكب تدور حول الأرض، أما كوبرنيكوس فأشار (مُحِقًّا) إلى أن جميع الكواكب تدور حول الشمس، وتيكو براهي افترض أن الكواكب الأخرى غير الأرضية تدور حول الشمس التي تدور بدورها حول الأرض التي تحتل مركز الكون.

أدرك جاليليو الطبيعة الواهية لتفسير براهي، وتوصَّلَ إلى الاستنتاج الصحيح والأكثر دقةً. وعلَّق منافس نيوتن، روبرت هوك، لاحقًا على هذا الأمر قائلًا إن كلًّا من نظرية كوبرنيكوس وتيكو اتفقَتَا مع بيانات جاليليو، لكن كان من الأكثر كياسةً القول: «نظرًا لما يتسم به العالم من اتساق وتناغم، لا يَسَعُ المرء سوى تبنِّي حُجَج كوبرنيكوس.»[3] وفيما بعدُ، ثبتت صحة حدس جاليليو بشأن حقيقة النظرية الأكثر جمالًا، ورجحت كفة تفسيره في النهاية عندما فسَّرتْ نظريةُ الجاذبية لنيوتن اتساقَ

البنية التي تصوَّرها كوبرنيكوس، وتنبَّأت بمدارات الكواكب. وبذلك دُحضت نظرية تيكو براهي، شأنها شأن نظام بطليموس. لقد كانت نظرية خاطئة؛ ومن ثَمَّ لم تستوعبها النظريات اللاحقة لأنها لم يمكنها ذلك. وعلى عكس الحال مع النظرية الفعَّالة، ما من تقريب للنظرية الحقيقية يؤدِّي إلى هذه التفسيرات غير المُتفقة مع نظرية كوبرنيكوس.

إن معيار التفسير الأشد اختصارًا يمكن أن يلعب أيضًا دورًا مهمًّا في التفسير العلمي الأولي؛ وذلك ما أظهره فشل نظرية تيكو الأصلية، وأثبتته فيزياء نيوتن. وعملية البحث تتضمن السعي للوصول إلى القوانين والمبادئ الأساسية التي تشمل البنى والتفاعلات التي تتم ملاحظتها. وبمجرد أن يوجد عدد كافٍ من الملاحظات، ترجح كفة النظرية التي تشمل النتائج في إطار مختصَر، وتقدِّم إطار عمل أساسيًّا تنبُّئيًّا، وهذا ما يوصلك إليه المنطق دومًا، الأمر الذي نعيه نحن معشر فيزيائيي الجسيمات في ظل انتظارنا المضني للبيانات التي ستحدِّد في النهاية ما نؤمِن به بشأن طبيعة الكَوْن الجوهرية.

ساعَدَ جاليليو في وضع الأساس للكيفية التي يعمل بها العلماء الآن، وإدراك التقدم الذي أطلق ذلك العالِم وآخرون غيره شرارتَه الأولى يُعِيننا في فهم طبيعة العلم على نحو أفضل، لا سيما فيما يتعلق بما تقدِّمه لنا الملاحظات والتجارب من مساعدة في تبيُّن الوصف الفيزيائي الصحيح، هذا بالإضافة إلى إدراك بعض الأسئلة المهمة التي يطرحها الفيزيائيون اليوم. وقد استند العلم المعاصر إلى جميع مدارك جاليليو، مثل أهمية التكنولوجيا والتجربة والنظرية والصياغة الرياضية، في محاولته للتوفيق بين الملاحظة والنظرية. ومن الأمور المهمة أن جاليليو قد أدرك التفاعل بين كل هذه العوامل في صياغة الأوصاف الفيزيائية للعالم.

صار بإمكاننا الآن التمتُّع بقدر أكبر من الحرية في تفكيرنا، مع سماحنا لثورة كوبرنيكوس بالاستمرار أثناء استكشافنا حدود النظام الكوني الخارجية، ووضعنا النظريات المتعلقة بالأبعاد الإضافية الممكنة أو الأكوان البديلة. تواصِلُ الأفكارُ الجديدة إبعادَ الإنسان عن المركز شيئًا فشيئًا، بالمعنى الحرفي والمجازي للكلمة، والملاحظات والتجارب إما ستثبت صحة هذه الاقتراحات أو تنفيها.

تتجلى حاليًّا الأساليب غير المباشرة للملاحظات، التي وظَّفها جاليليو في عمله، في الكواشف الدقيقة الموجودة في مصادم الهادرونات الكبير. وفي عرض أخير بمعرض بادوَا، شاهدتُ تطوُّر العلم وصولًا إلى العصر الحالي، بالإضافة إلى أجزاء من تجارب مصادم الهادرونات الكبير. واعترف مرشدنا آنذاك أنه كان متحيِّرًا بشأن ذلك العرض

إلى أن أدرَكَ أن مصادم الهادرونات الكبير هو أفضل ميكروسكوب توصَّلَتْ إليه البشرية حتى الآن؛ إذ يسبر غور مسافات أصغر بكثير مما سبق ملاحظته على الإطلاق.

ومع دخولنا نُظُمًا جديدة من الدقة في القياس والنظريات، يتردد صدى فهم جاليليو لكيفية تصميم التجارب وتفسيرها. وتفرض أفكاره نفسها عند استخدامنا الأجهزة للوصول إلى صور أبعد ما تكون عن المرئية بالعين المجردة، وتطبيقنا أفكاره بشأن كيفية عمل المنهج العلمي باستخدام التجارب لإثبات الأفكار العلمية أو دحضها. كان المشاركون في مؤتمر بادوَا يفكِّرون فيما يمكن التوصُّل إليه قريبًا، وما قد تعنيه هذه الاكتشافات، على أمل أن نتجاوز عن قريب حدودًا جديدة للمعرفة. وفي هذه الأثناء، سنواصل البحث.

الفصل الثالث

العيش في عالم مادي

في فبراير ٢٠٠٨، نظَّم كلٌّ من عالم الأحياء والرياضيات فريد أدلر والشاعرة كاثرين كولز — اللذين يعملان في جامعة يوتا بمدينة سولت ليك سيتي — مؤتمرًا متعدِّد التخصصات تحت عنوان «كَوْن في حَبَّة رمال». كان موضوع المؤتمر هو دور النطاق في العديد من الفروع المعرفية، وهو الموضوع الذي كان من الممكن الاستفادة فيه من الاهتمامات المختلفة لمجموعة الحضور والمتحدثين المتنوعة في المؤتمر. وقد تمكَّنَ جميع أعضاء لجنتنا — المكوَّنة من عالمة فيزياء، وناقد هندسي معماري، وأستاذة لغة إنجليزية — من المشاركة على نحو مثير للاهتمام في تقسيم ما لدينا من ملاحظات إلى فئات متباينة الأحجام لنتمكَّن من استيعابها، وتنظيمها، ثم تجميعها معًا مجدَّدًا.

في خطاب ليندا جريجرسون الافتتاحي، وصفت تلك الشاعرة والناقدة الأدبية الكَوْن بـ «السمو»، الكلمة التي تجمع ببراعة بين ما يجعل الكَوْن غايةً في الروعة وغايةً في الإحباط في الوقت نفسه؛ فثمة قدر هائل من الأمور لا يمكننا الوصول إليها وفهمها، وإنْ ظلت تبدو قريبة بحيث تتحدانا لخوضها وفهمها. والتحدي الذي تواجهه كافة الأساليب المعرفية هو جعل هذه الجوانب — التي يتعذَّر الوصول إليها في الكَوْن — أكثر وضوحًا وقابليةً للفهم، وأخيرًا أقل غرابةً. يبغي الناس تعلُّم قراءة كتاب الطبيعة وفهمه، واستيعاب هذه الدروس في العالم القابل للفهم.

تستعين البشرية بأساليب عِدَّة لحل ألغاز الحياة والعالم، وتسعى نحو أهداف متباينة من وراء ذلك. ويقدِّم كلٌّ من الفن والعلم والدين — رغم اشتراكهم في بعض الدوافع الإبداعية — أساليبَ ووسائلَ متباينةً لسدِّ الثغرات في فهمنا.

لذا، وقبل العودة إلى عالَم الفيزياء المعاصرة، سيعرض باقي هذا الجزء من الكتاب مقارنةً بين هذه الأساليب الفكرية المختلفة، ويقدِّم سياقًا تاريخيًّا للجدال بين العلم

والدين، ويعرض جانبًا واحدًا على الأقل من هذا الجدال الذي لن يُحَلَّ أبدًا. وفي أثناء تناول هذه الموضوعات، سنستكشف معًا الافتراضات المادية والميكانيكية للعلم، وهي سمة أساسية في التناول العلمي للمعرفة، ولن يغيِّر ذلك على الأرجح من موقف مَن هم على طرفَي النقيض في هذا الجدال، لكنْ لعلَّ المناقشة ستساعد في التعرُّف على نحوٍ أكثر دقةً على جذور الاختلافات بين الفريقين.

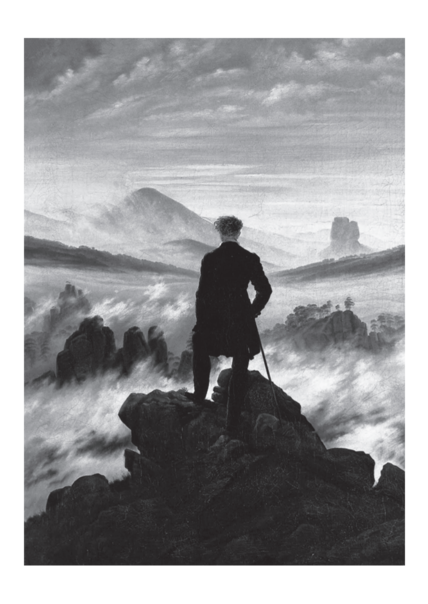
نطاق المجهول

عبَّرَ الشاعر الألماني، راينر ماريا ريلكه، تعبيرًا واضحًا عن التناقض الذي يكمن داخلنا عند مواجهتنا السمو، وذلك فيما كتبه: «وما الجمال سوى بداية رعب يكاد لا يُحتمَل، وما يزيد من تروعينا أنه يسمو عن الفتك بنا.»[1] أما ليندا جريجرسون في خطابها بمؤتمر سولت ليك سيتي، فتناولت موضوع السمو باستخدام كلمات دقيقة وواضحة وأقل تخويفًا بعض الشيء؛ فعرضت تمييز «إيمانويل كانت» بين الجمال الذي «نؤمن بموجبه بأننا مخلوقون لهذا الكون، والكون مخلوق لنا»، والسمو الذي ينطوي على قدر أكبر من الرعب. أوضحت جريجرسون كيف أن الناس يشعرون «بالخوف من إبصار السمو» لأنه أقل ملاءمةً لهم؛ أي إنه لا يتناسب مع تفاعلات البشر ومداركهم.

عادت كلمة «السمو» للظهور في حياتي في عام ٢٠٠٩ في المناقشات حول الموسيقى والفن والعلم التي جرت بيني وبين شركائي في عمل أوبرالي قائم على الفيزياء يتناول هذه الموضوعات. رأى قائد الأوركسترا، كليمنت باور، أن ثمة مقطوعات موسيقية معينة جمعت أحيانًا بين الخوف والجمال بحيث وصفها الناس بهاتين الصفتين على نحو متزامن، والموسيقى السامية — في نظره — أمر يتخطَّى حدود قدراته العادية على الفهم؛ إذ تُعارض أي تفسير مُعَدٍّ مسبقًا.

يقدِّم السمو نطاقات ويطرح أسئلة قد تتجاوز قدراتنا العقلية؛ لذلك فهو مرعب وساحر في آنٍ واحد. ويتغير نطاق السمو بمرور الوقت مع تغطية النطاقات التي نرتاح إليها مجالًا متزايد الاتساع، لكننا نظل نسعى دومًا لاكتساب معلومات دقيقة عن السلوكيات أو الأحداث التي تنتمي إلى نطاقات أصغر أو أكبر بكثير مما يمكننا استيعابه بسهولة.

يتسم الكون الذي نعيش فيه بالسمو من نواحٍ عدة، ويدفعنا للتساؤل، لكنه قد يكون مخيفًا — بل مفزعًا أيضًا — بسبب تعقيده، ومع ذلك فإن مكوناته تتناغم بعضها



شكل ٣-١: لوحة «هائم فوق بحر من الضباب» لكاسبر دافيد فريدريش (١٨١٨)، وهي لوحة ترمز إلى السمو الذي يتكرَّر تناولُه في الفن والموسيقى.

مع بعض بصور مذهلة. ويهدف الفن والعلم والدين على حدٍّ سواء إلى توجيه فضولنا وتنوير عقولنا من خلال توسيع آفاق مداركنا، وتَعِدُ هذه المجالات الثلاثة، كلٌّ بطريقته المختلفة، بتقديم يد العون لنا في تخطِّي الحدود الضيقة لخبراتنا الفردية، والسماح لنا بالدخول في عالم السمو وفهمه (انظر الشكل ٣-١).

يسمح لنا الفن باستكشاف الكَوْن عبر المشاعر والمدارك البشرية، فيتناول كيف نصل بحواسنا إلى العالم، وما يمكننا تعلُّمه من هذا التفاعل، مع إلقاء الضوء على كيفية مشاركة الناس في الكَوْن وكيفية رصدهم له. والفن في أساسه وظيفة بشرية؛ إذ يمنحنا صورةً أوضح لحدسنا، وكيفية إدراكنا للعالم كبشر. وعلى عكس العلم، لا يسعى الفن للوصول إلى الحقائق الموضوعية التي تتجاوز التفاعلات بين البشر، وإنما يهتم باستجاباتنا الجسدية والعاطفية تجاه العالم الخارجي، مع التركيز مباشرةً على خبراتنا الداخلية وحاجاتنا وقدراتنا التي قد لا يتمكَّن العلم من بلوغها أبدًا.

على الجانب الآخَر، يسعى العلم لبلوغ حقيقة العالَم الموضوعية الممكن إثبات صحتها، ويهتم بالعناصر التي يتألَّف منها الكَوْن وكيفية تفاعُل هذه العناصر معًا. نجد مثلًا شيرلوك هولمز يصف في إعجاب منهجية العلم التي ينطوي عليها أسلوبه الفذُّ، رغم أنه كان يشير في حديثه إلى تحقيقات الطب الشرعي التي كان يجريها، وذلك أثناء توجيهه النصائح للدكتور واطسون، فيقول له هولمز: «إن التحري علم دقيق (أو هكذا يجب أن يكون)، ويجب التعامل معه بالأسلوب ذاته المُجرَّد من العواطف. لقد حاولتَ، يا واطسون، أن تضفي عليه بعض الرومانسية؛ الأمر الذي سيُسفِر عن نتيجة تُشبه نتيجةَ التعامل مع قصة حبٍّ أو هروبِ مُتحابَّيْنِ باستخدام افتراض إقليدس الخامس … النقطة الوحيدة التي تستحق الذكر في القضية هي الاستدلال التحليلي الذي ينتقل من النتائج إلى الأسباب، وهو الذي نجحتَ في الكشف عنه.»[2]

لا ريبَ أن سير آرثر كونان دويل كان سيجعل هولمز يعبِّر عن مثل هذا المنهج إذا كان يتحدَّث عن الكشف عن أسرار الكَوْن. إن العاملين في مجال العلم يسعون للحيلولة دون تشويش الحدود والتحيزات البشرية على أفكارهم، ليثقوا في توصُّلهم إلى فهم غير متحيز للحقيقة. ويحقِّق العلماء ذلك من خلال المنطق والملاحظات المجمعة، فيحاولون التوصُّل بموضوعية إلى كيفية حدوث الأشياء، والإطار المادي الأساسي الذي قد يكون مسئولًا عمَّا يلاحظونه.

تجدر الإشارة هنا إلى أن شيرلوك هولمز يستخدم المنطق الاستقرائي، وليس الاستدلالي كما يشير في حواره مع دكتور واطسون، شأنه شأن أغلب المحقِّقين والعلماء عند محاولتهم تجميع الأدلة؛ فيعمل العلماء والمحققون باستقراء الملاحظات في محاولةٍ لتكوين إطار مُتَّسِقٍ يتماشى مع جميع الظواهر المدروسة، وبمجرد أن تُوضَع النظرية، يبدأ العلماء والمحققون في الاستدلال أيضًا من أجل التنبؤ بظواهر وعلاقات أخرى في العالم، لكن بالوصول إلى هذه المرحلة، يكون العمل قد تمَّ، على الأقل للمحققين.

أما الدين، فهو أسلوب آخَر يتبعه الكثيرون استجابةً للتحديات التي وصفتها جريجرسون بأنها تتعلق بالجوانب التي يصعب الوصول إليها في الكَوْن. كتب المؤلف البريطاني سير توماس براون، الذي عاش في القرن السابع عشر، في كتابه «ديانة طبيب»: «كم أحبُّ أن أغرق في لغزٍ ما، وأسعى للوصول بفكري إلى أسمى الحدود.»[3] رأى براون وأمثاله أن المنطق والمنهج العلمي غير كافيين للوصول إلى الحقيقة الكاملة التي يثقون في أن الدين وحده هو الذي يمكنه بلوغها. ولعل الاختلاف الرئيسي بين العلم والدين

يكمن في طبيعة الأسئلة التي اختار هؤلاء الأشخاص طرحها. يتناول الدين أسئلة تقع خارج نطاق العلم؛ فالدين يسأل عن الأسباب بافتراض وجود هدف خفي، في حين يسأل العلم عن الكيفية، ولا يعتمد العلم مطلقًا على فكرة وجود هدف خفي في الطبيعة، فهذا النوع من التساؤلات نتركه للدين أو الفلسفة، أو نغض الطرف عنه تمامًا.

أثناء حديثي مع كاتب السيناريوهات، سكوت دريكسون، في لوس أنجلوس، قال لي إن السيناريو الأصلي لفيلم «اليوم الذي توقَّفَتْ فيه الأرضُ» (وهو الفيلم الذي أخرجه عام ٢٠٠٨ مُقتبِسًا إياه من فيلم يحمل العنوان نفسه صدر عام ١٩٥١) تضمَّنَ جملة أزعجته للغاية لدرجة أنه ظل يفكِّر فيها مدة أيام بعد ذلك؛ كان من المفترض لشخصية جنيفر كونولي عند تحدُّثها عن وفاة زوجها أن تُعلِّق على الأمر قائلةً: «إن الكَوْن عشوائي.»

أزعجت هذه العبارة سكوت لأن القوانين الفيزيائية الأساسية تنطوي على عشوائية بالفعل، لكن هدفها الأساسي هو احتواء نظام يمكن من خلاله على الأقل اعتبار بعض جوانب الكَوْن ظواهر يمكن التنبؤ بها. أخبرني سكوت أن الأمر استغرق منه أسابيع بعد حذف الجملة من السيناريو ليصل إلى الكلمة التي كان يبحث عنها؛ أَلَا وهي: «غير مكترث». أثَارَ انتباهي بعد ذلك سماعي الجملة ذاتها في المسلسل التليفزيوني «رجال ماديسون» على لسان الشخصية الرئيسية، دون دريبر، على نحو جعلها تبدو كريهة.

لكن عدم اكتراث الكَوْن ليس بالأمر السيئ، وليس بالجيد أيضًا؛ فلا يبحث العلماء عن الغاية المقصودة مثلما يفعل الدين، ولا يطلب منَّا العلم الموضوعي سوى التعامل مع الكَوْن على أنه لا مبالٍ. ولا ريب أن العلم في موقفه المحايد يستبعد أحيانًا مفهوم الشر من الظروف الإنسانية عن طريق الإشارة إلى الأصل المادي لهذه الظروف، وليس الأخلاقي. فنحن نعلم الآن، على سبيل المثال، أن المرض العقلي والإدمان لهما أسبابهما المادية والوراثية «البريئة» التي يمكن أن تُدخِلهما في فئة الأمراض، وتعفيهما من أي جانب أخلاقي.

ومع ذلك، فإن العلم لا يتناول جميع المسائل الأخلاقية (وإن كان لا ينكرها في الوقت ذاته كما يدَّعِي البعض أحيانًا)، أيضًا لا يتساءل العلم عن الأسباب وراء سلوك الكَوْن، أو يتحرى عن الجانب الأخلاقي في العلاقات الإنسانية. ومع أن التفكير المنطقي يساعد بالتأكيد في التعامل مع العالم المعاصر — ويبحث بعض العلماء بالفعل حاليًّا عن الأسس النفسية وراء التصرفات الأخلاقية — فإن هدف العلم بوجه عام ليس الوصول إلى أحكام بشأن موقف البشر الأخلاقي.

إن الخط الفاصل هنا ليس دقيقًا دومًا، ويمكن لرجال الدين أحيانًا طرح أسئلة علمية، في حين يمكن للعلماء استنباط أفكارهم الأولية أو توجُّهاتهم من نظرتهم للعالم التي تلهمهم، بل من نظرتهم الدينية في بعض الأحيان أيضًا. بالإضافة إلى ذلك، ونظرًا لأن مَن يضطلع بالعمل العلمي بشر، فإن المراحل الوسيطة التي يضع فيها العلماء نظرياتهم تتضمن عادةً حدسًا بشريًّا غير علمي، مثل الإيمان بوجود أجوبة أو مشاعر ما بشأن معتقدات معينة. وغني عن القول أن العكس صحيح أيضًا؛ فالفنانون وعلماء الدين يمكن أن يستمدوا توجيههم من الملاحظات والفهم العلمي للعالم.

من ناحية أخرى، لا تمحي هذه التقسيمات — التي تتسم بالضبابية أحيانًا — الاختلافات في الغايات النهائية؛ فالعلم يهدف للوصول إلى صورة مادية تنبُّئية بإمكانها تفسير كيفية عمل الأشياء. والأساليب والأهداف الخاصة بالعلم والدين مختلفة جوهريًّا؛ فالعلم يتناول الحقيقة المادية، في حين يتناول الدين الحاجات أو الرغبات البشرية الاجتماعية أو النفسية.

هذا الاختلاف في الغاية من المفترض ألَّا يكون داعيًا للنزاع، بل إنه في الواقع يؤدي إلى تقسيم جيد للعمل كما هو واضح. لكن الديانات لا تلتزم دومًا بالتساؤلات عن الغاية أو السعي وراء الراحة، ويحاول الكثير منها تناوُلَ الحقيقة الخارجية للكَوْن أيضًا، ويتضح ذلك في تعريف كلمة «الدين» في القواميس؛ فنجد قاموس التراث الأمريكي يعرِّفه بأنه «الإيمان بوجود قوة أو قوًى إلهية أو فائقة للبشر يلزم طاعتها وعبادتها باعتبارها الخالقة والحاكمة للكَوْن.» وفي قاموس «ديكشنري دوت كوم» على الإنترنت، الدين هو: «مجموعة من المعتقدات المتعلقة بمُسبِّبات الكَوْن وطبيعته والهدف منه — لا سيما مع اعتباره خلقًا لكيان أو كيانات فائقة للبشر، ويتضمن ذلك عادةً ملاحظات شرائعية وتعبُّدية — ووضع قواعد أخلاقية تحكم العلاقات الإنسانية.» وفقًا لهذه التعريفات، لا يتعلق الدين بالعلاقة بين الناس والعالم فحسب — سواء أكانت هذه العلاقة أخلاقية أم عاطفية أم روحانية — وإنما بالعالم نفسه؛ الأمر الذي يجعل الرؤى الدينية عرضةً للتحريف. وعندما يتخطَّى العلم حدوده ليتدخَّل في المجالات المعرفية التي يحاول الدين تفسيرَها، تظهر الخلافات.

بالرغم مما يجمع بين البشر من رغبة في تحصيل المعرفة، فإن أصحاب المناهج المختلفة في طرح الأسئلة والبحث عن أجوبة لها، أو أصحاب الأهداف المتباينة، لا يكونون دومًا على وفاق، والسعي وراء الحقيقة لا تفصله دائمًا حدودٌ فاصلة واضحة تحول

دون النزاع بين الأطراف المتباينة. وعندما يطبِّق الناس معتقداتهم الدينية على العالم الطبيعي، فإن الملاحظات على الطبيعة قد تتعارض مع هذه المعتقدات، وفي هذه الحالة على الدين أن يكيف نفسه وفقًا لهذه الملاحظات. انطبَقَ ذلك في الماضي على الكنيسة القديمة — التي تحتَّمَ عليها مثلًا تحقيقُ الوفاق بين الإرادة الحرة وقوى الرب غير المحدودة — كما ينطبق في الوقت الحاضر بالقدر نفسه على المفكِّرين الدينيين.

هل العلم والدين متوافقان؟

لم يواجِه العلم والدين دومًا هذه المعضلة؛ فقبل الثورة العلمية تعايَشَ العلم والدين معًا في سلام، وفي العصور الوسطى رحَّبت الكنيسة الكاثوليكية الرومانية بالتوسُّع في تفسيرات الكتاب المقدس، الأمر الذي استمَرَّ حتى هدَّدت حركة الإصلاح سيادة الكنيسة. وأدلة جاليليو على صحة نظرية كوبرنيكوس حول مركزية الشمس — التي تعارضت مع ادعاءات الكنيسة بشأن السماوات — كانت مصدرًا للقلق بشكل خاص في هذا السياق. ونشْر جاليليو لِما توصَّلَ إليه من نتائج لم يمثِّل تحدِّيًا فحسب لأوامر الكنيسة، وإنما شكَّك بوضوح في هيمنة الكنيسة على تفسير الكتاب المقدس الذي انفردت به وحدها؛ ومن ثَمَّ أَكَنَّ رجال الدين بغضًا لجاليليو وادعاءاته.

شهد التاريخ الحديث كذلك العديدَ من أمثلة الصراع بين العلم والدين. على سبيل المثال، القانون الثاني للديناميكا الحرارية — الذي ينصُّ على أن العالم يتقدَّم نحو مزيد من الفوضى — من شأنه إفزاع مَن يؤمنون بأن الرب قد خلق عالمًا مثاليًّا. ولا ريب أن نظرية التطور تتسبَّب في مشكلات مماثلة؛ إذ أثارت مؤخرًا «مجادلات» حول ما يُعرَف بالتصميم الذكي. وفكرة تمدُّد الكون أيضًا يمكن أن تزعج مَن يريدون الإيمان بأنهم يعيشون في كَوْن مثالي، ذلك بغض النظر عن أن أول مَن اقترح نظرية الانفجار العظيم كان القس الكاثوليكي، جورج لومتر.

ومن الأمثلة الأخرى الأكثر تشويقًا أيضًا للعلماء الذين يدخلون في مواجهة مع إيمانهم الديني عالِم الطبيعة الإنجليزي، فيليب جوس. واجه جوس معضلة عندما أدرك — في مطلع القرن التاسع عشر — أن طبقات الأرض، التي تشتمل على حفريات لحيوانات منقرضة، تتعارض مع فكرة أن عمر الأرض لا يتجاوز ٦٠٠٠ عام فقط. وفي كتابه «السُّرَّة البدئية: محاولة لربط العقدة الجيولوجية»، حسم الصراع داخله بإقراره أن الأرض قد خُلِقت مؤخرًا، لكنها تضمَّنَتْ خلقًا خاصًّا من «عظام» و«حفريات» لحيوانات

لم يسبق لها وجودٌ قط، وغير ذلك من العلامات المُضلِّلة لتاريخها (الذي ليس له وجود). افترض جوس أن العالَم الذي تسير فيه الأمور بكفاءة ينبغي أن يُظهِر علامات للتغيير، حتى إن لم تحدث هذه التغييرات بالفعل مطلقًا. قد يبدو ذلك ساذجًا، لكنه قابِل للتصديق من الناحية الفنية، ومع ذلك ما من أحد بَدَا كأنه يأخذ هذا التفسير على محمل الجد. جوس نفسه تحوَّلَ إلى دراسة الأحياء البحرية لتجنُّب ما كانت تفرضه عظام الديناصورات التي كان يدرسها من اختبارات مزعجة لإيمانه.

لحسن الحظ، صارت أكثر الأفكار العلمية صحةً أقل تطرُّفًا في مظهرها وأكثر قبولًا مع الوقت. وفي النهاية، تسود دومًا الاكتشافات العلمية، فلم يَعُدْ أحد يتشكَّك الآن في وجهة النظر القائلة بمركزية الشمس أو تمدد الكون، لكن التفسيرات الحرفية لا تزال تتسبَّب في مشكلات، مثل ما تسبَّبت فيه تفسيرات جوس من مشكلات لدى المؤمنين الذين أخذوها على محمل الجد.

وجدير بالذكر هنا أن قراءات الكتاب المقدس الأقل التزامًا بالمعنى الحرفي ساعدَتْ في تجنُّب النزاعات في الفترة السابقة للقرن السابع عشر. وفي حديث لي مع الباحثة والمؤرخة الدينية كارين أرمسترونج، أثناء تناولنا الغداء، أوضحت لي كيف أن الخلاف الحالي بين الدين والعلم لم يكن موجودًا قديمًا، فكانت النصوص الدينية تُقرَأ على مستويات عدة؛ ومن ثَمَّ كان التفسير أقلَّ جزمًا والتزامًا بالمعنى الحرفي؛ ومن ثَمَّ أقل إثارةً للمعارضات.

وقد أوضَحَ القديس أوغسطينوس وجهةَ النظر هذه في القرن الخامس بقوله: «يعلم غالبًا غير المسيحي أمورًا عن الأرض والسماوات وغير ذلك من أجزاء الكون، وعن حركات النجوم ومداراتها، بل أحجامها والمسافات بينها أيضًا، ويتمسك بهذه المعرفة عن يقين بناءً على المنطق والتجربة؛ لذلك فإنه من المشين والمخزي أن يسمع غيرُ المؤمن مسيحيًّا ينطق بتُرَّهَات عن مثل هذه الأمور، مدَّعِيًا أنه يستند فيما يقوله إلى الكتاب المقدس. علينا بذل كلِّ ما في وسعنا لتجنب مثل هذا الموقف المشين، خشيةَ ألَّا يرى غير المؤمن في المسيحي سوى الجهل ويسخر منه مستهزئًا.»[4]

لم تقتصر فطنة أوغسطينوس على هذا الحد فحسب، وإنما أوضح أيضًا أن الرب قد وضع أحاجي في الكتاب المقدس لمنح الناس متعةَ حلِّها.[5] وكان يشير بذلك إلى الكلمات المبهمة والفقرات التي تطلَّبَتْ تفسيرًا مجازيًّا. يبدو أن أوغسطينوس قد استمتع بما انطوى عليه الأمر من منطق ولامنطق، وحاوَلَ تفسير التناقضات الجوهرية. على سبيل المثال، كيف يمكن لأي شخص إدراك أو تقدير خطط الرب على النحو الكامل، على الأقل في غياب السفر عبر الزمن؟[6]

جاليليو نفسه التزم بموقف أوغسطينوس، ففي خطاب كتبه عام ١٦١٥ لدوقة توسكانا الكبرى، مدام كريستينا دي لورين، قال: «أعتقد في المقام الأول أنه من الورع القول بأنه يستحيل أن ينطوي الكتاب المقدس على أي كذب — شريطة فهم المعنى الصحيح له — ومن الحكمة التأكيد على ذلك.»[7] بل ذهب جاليليو كذلك إلى أن هذا الموقف قد تبنَّاه كوبرنيكوس كذلك، مؤكِّدًا على أن كوبرنيكوس «لم يتجاهل الكتاب المقدس، لكنه علم جيدًا أنه في حال إثبات اعتقاده، لن يتعارض مع الكتاب المقدس عند الفهم الصحيح له.»[8]

وفي ظل تحمُّس جاليليو، كتب أيضًا مُقتبِسًا من أوغسطينوس قوله: «عندما يقارِن أي شخص بين سلطة النص المقدس والمنطق الواضح والجلي، فإنه يعلم ما أخذه على عاتقه؛ إذ يعارِض حقيقةَ الكتاب المقدس بذلك وليس معناه؛ فالمعنى يفوق قدرته على الفهم، أو بالأصح قدرته على التفسير. إنه لا يعارض الكتاب المقدس، وإنما ما وجده داخل نفسه ويتخيَّل أنه موجود بالفعل.»[9]

أما تناوُل أوغسطينوس الأقل تزمتًا للكتاب المقدس، فقد افترض أن النص له دائمًا معنى منطقي، وأي تناقض ظاهر مع الملاحظات للعالم الخارجي إنما هو تجسيد لسوء فهم القارئ، حتى إن لم يكن التفسير واضحًا. نظر أوغسطينوس للكتاب المقدس كناتج للتجلِّي الإلهي كما يصوغه البشر.

ومن خلال تفسير أوغسطينوس للكتاب المقدس بأنه — على الأقل جزئيًّا — انعكاسٌ لتجارب كاتبيه الشخصية، يأتي تفسيره له مشابهًا لتعريفنا للفن في بعض الجوانب. ولا حاجة للكنيسة إلى تغيير موقفها في مواجهة الاكتشافات العلمية مع أسلوب تفكير أوغسطينوس.

أدرك جاليليو ذلك؛ ففي نظره ونظر مَن يفكِّرون مثله، لا يمكن أن يكون هناك صراع بين العلم والكتاب المقدس إذا تمَّ تفسير الكلمات تفسيرًا صحيحًا، وأي صراع ظاهري لا يكمن في الحقائق العلمية، وإنما في الفهم البشري. لعل الكتاب المقدَّس يبدو غير مفهوم للبشر في بعض الأحيان، أو قد يبدو أنه يتناقض ظاهريًّا مع ملاحظاتنا، لكنْ وفقًا لتفسير أوغسطينوس، الكتاب المقدس دائمًا على صواب. كان جاليليو وَرِعًا، ولم يعتقد بأن لديه السلطة لمخالفة الكتاب المقدس، حتى عندما أشار عليه المنطق بذلك، بعد ذلك بعدة سنوات، وصل الحد بالبابا يوحنا بولس الثاني إلى أن يعلن أن جاليليو عالم دين أفضل بكثير ممَّنْ يعارضونه.

لكن جاليليو آمَن كذلك باكتشافاته، وفي نوع من الخطاب الديني الحاد اللهجة، قال جاليليو ناصحًا: «لتنتبهوا يا علماء الدين! في ظل رغبتكم في اعتبار الافتراضات المتعلقة بثبات الشمس والأرض عقائد إيمانية، تعرِّضون أنفسكم في النهاية لخطر إدانة مَن يقولون بثبات الأرض وتحرُّك الشمس بالهرطقة، في الوقت الذي قد يثبت فيه فيزيائيًّا ومنطقيًّا تحرك الأرض وثبات الشمس.»[10]

من الجلي أن الدين المسيحي لم يلتزم دومًا بهذه الفلسفة، وإلا فما كان جاليليو ليُسجَن، وما كانت الصحف حاليًّا لتنشر أخبارًا عن المجادلات المُثارة حول فكرة التصميم الذكي. وبالرغم من أن العديد من ممارسي الدين يتمتعون بالمرونة في معتقداتهم، فإننا قد نواجه مشاكل من جراء التفسير المُتزَمِّت للظواهر الفيزيائية. من الخطورة التمسك بالقراءة الحرفية للكتاب المقدس؛ فبمرور الوقت، ومع سماح التكنولوجيا لنا بتحديد نطاقات النظم الجديدة، ستزداد المجالات التي يتداخل فيها العلم والدين، وكذلك أَوْجُه الاعتراض المحتملة بينهما.

وحاليًّا، يهدف عدد كبير من المتدينين في العالم إلى تجنُّب مثل هذه النزاعات عن طريق اتباع تفسير أكثر تحرُّرًا لمعتقداتهم؛ فلا يعتمدون بالضرورة على التفسير المُتزمِّت للكتاب المقدس أو أي عقيدة معينة، وإنما يؤمنون بأنهم يتمسَّكون بمبادئ الجانب الروحاني في حياتهم مع قبولهم لنتائج العلم الحازمة.

الأسباب المادية

إن المشكلة الجوهرية تكمن في أن التناقضات بين العلم والدين أعمق بكثير مما يمكن لأي كلمات أو عبارات أن تعكسه. وحتى إذا استبعدنا القلق المتعلق بالتفسير الحرفي لأي نص معين، فإن العلم والدين يعتمدان على مبادئ منطقية غير متوافقة، ويتضح ذلك عندما نرى أن الدين يتناول المسائل المتعلقة بعالمنا ووجودنا من خلال فكرة تدخُّل إله خارجي، فالأفعال الإلهية — سواء المؤثرة على الجبال أو على ضميرك — لا تدخل في إطار العلم.

إن التناقض المهم هو ذلك القائم بين الدين، باعتباره خبرة اجتماعية أو نفسية، والدين القائم على فكرة الإله الذي يؤثِّر بفعالية علينا أو على عالمنا بالتدخُّل الخارجي. ففي النهاية، الدين أمر شخصي تمامًا في نظر البعض، ولعل مَن يفكِّرون على هذا النحو يستمتعون بالتواصل الاجتماعي الناتج عن عضويتهم في كيان ديني مشابِه لهم

في طريقة التفكير، أو بالفوائد النفسية الناتجة عن النظر لأنفسهم في إطار عالم أكبر. والإيمان بالنسبة لَمَن ينتمون لهذه الفئة من البشر يتعلَّق بممارسته وكيفية اختيارهم لسبيل حياتهم. إنه مصدر للراحة في ظل مجموعة مشتركة من الأهداف.

كثيرٌ من هؤلاء الناس يعتبرون أنفسهم روحانيين، يعزز الدين من وجودهم؛ إذ يمنحهم السياق والمعنى والغاية، وكذلك الشعور بروح الجماعة، ولا يرون أن دور الدين هو تفسير آليات عمل الكون؛ فالدين يتناوَل حِسَّهم الشخصي بالدهشة والتعجُّب، وقد يساعدهم في تفاعلاتهم مع الآخَرين والعالم من حولهم، والكثيرُ منهم يذهبون إلى أن الدين والعلم يمكنهما التعايش معًا على نحو ممتاز.

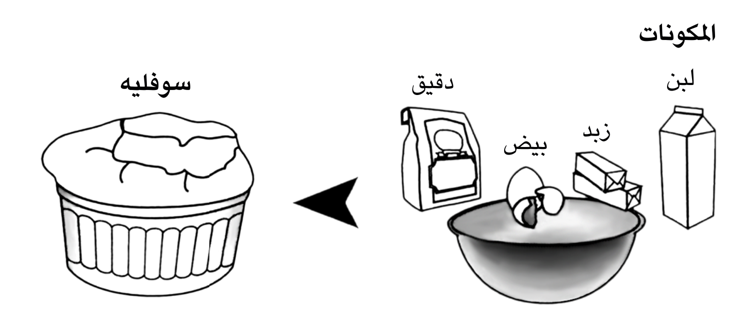
لكن الدين في أغلب الأحيان يتجاوز بكثير كوْنه مجرد أسلوب حياة أو فلسفة؛ فتنطوي أغلب الديانات على إله قادر على التدخُّل بطرق غامضة تفوق ما يمكن للناس وصفه أو للعلم اشتماله. مثل هذا الإيمان — حتى في نظر أكثر المتدينين انفتاحًا في التفكير والذين يرحِّبون بالتقدم العلمي — يتسبَّب في معضلة حتمية بشأن كيفية تحقيق التوافق بين هذا التدخل وما يمليه علينا العلم. فإذا قبلنا بفكرة أن الإله أو أي قوة روحية أخرى قد أحدثت تأثيرًا في السابق كمُسبِّب رئيسي لما نشهده الآن، فليس من الممكن من وجهة النظر العلمية أن يستمر الإله في هذا التدخل دون تَرْك أي أثر مادي على أفعاله.

لكي نفهم هذا الصراع — ونُقدِّر طبيعة العلم على نحو أفضل — علينا فهم وجهة النظر المادية للعلم فهمًا كاملًا، وهي وجهة النظر التي تنص على أن العلم ينطبق على كَوْن مادي، وأن التأثيرات الفعَّالة لها مسبِّباتٌ ماديةٌ مرتبطة بها. ويرتبط بوجهة النظر هذه الفكرة التي عرضناها في الفصل الأول من هذا الكتاب، والتي تقول بأنه يمكننا التعرُّف على مكونات المادة عند كل مستوًى من مستويات بنيتها، وما يوجد في النطاقات الكبيرة يتألَّف من المواد الموجودة في النطاقات الصغيرة. وبالرغم من أنه لا يمكننا بالضرورة تفسير كل شيء عن النطاقات الكبيرة عن طريق معرفة العناصر المادية المكونة لها، فإن هذه المكونات ضرورية، والتكوين المادي للظواهر التي تُهمنا لا يكفي دومًا لتفسيرها، لكن الأسباب المادية المرتبطة بها تلعب دورًا مهمًّا في وجودها.

يلجأ بعض الناس إلى الدين للإجابة عن الأسئلة الصعبة التي لا يعتقدون أن العلم سيصل إليها مطلقًا. ولا ريب أن وجهة النظر العلمية المادية لا تعني ضمان فهمنا لكل شيء بالضرورة، على الأقل ليس عن طريق فهم المكونات الأساسية؛ فمن خلال تقسيم الكون إلى نطاقات، يدرك العلماء أنه من غير المحتمل أن نجيب عن كل الأسئلة

مرةً واحدةً، وأنه على الرغم من أن التكوين الأساسي قد يكون ضروريًّا، فإنه لا يجيب بالضرورة على جميع أسئلتنا مباشَرَةً. وحتى عندما نتعلَّم ميكانيكا الكم، نظل نستخدم قوانين نيوتن؛ لأنها توضِّح لنا كيف تنتقل الكرة عبر مجال جاذبية الأرض على نحو قد يكون فهمُه من الناحية الذرية صعبًا للغاية. تحتاج الكرة إلى ذرات بالطبع ليكون لها وجود، لكن الجانب الذري لا يفيد في تفسير مسار الكرة، وإن كان متَّفِقًا معه بالطبع.

ينطبق هذا الدرس بوجه عام على الكثير من الظواهر التي نراها في حياتنا اليومية، فيمكننا عادةً تجاهُل التكوين أو التفاصيل الجوهرية، رغم أن المادة المكونة نفسها مهمة؛ فلا حاجة لنا لمعرفة آليات العمل الداخلية للسيارة لكي نقودها، وعندما نطهو الطعام، فإننا نُقدِّر ما إذا كان السمك طريًّا، وقلب الكعكة جافًّا، والشوفان هشًّا، والسوفليه ناضجًا ومرتفعًا، لكننا إذا لم نكن متخصِّصين في فن الطهي الجزيئي، فنادرًا ما سننتبه إلى التركيب الذري الداخلي لهذه الأشياء، المسئول عن هذه التغييرات. بَيْدَ أن ذلك لا يغيِّر حقيقة أن الطعام دون جوهر لا يكون مرضيًا؛ فمكونات السوفليه لا تشبه على الإطلاق الناتج النهائي له (انظر الشكل ٣-٢). رغم ذلك، فإن الجزيئات والعناصر المكونة لطعامك التي تسعد بتجاهلها ضرورية في صنعه.



شكل ٣-٢: يختلف السوفليه تمامًا عن مكوناته. وبالمثل، قد يكون للمادة خصائص مختلفة تمامًا — أو تبدو أنها تتبع قوانين فيزيائية مختلفة تمامًا — عن المادة الأكثر جوهريةً التي تتكون منها.

على نحو مماثل، من الصعب على أي أحد تعريف الموسيقى تعريفًا دقيقًا، لكن أي محاولة لوصف هذه الظاهرة واستجابتنا العاطفية لها ستتضمن على الأرجح النظر

إليها على مستوًى بعيد عن الذرات والخلايا العصبية. ورغم أننا نفهم الموسيقى عندما تسجل آذانُنا الموجاتِ الصوتيةَ الصادرةَ عن آلات مضبوطة بشكل خاص، فإن الموسيقى أكثر بكثير من مجرد ذرات الهواء الفردية المتذبذبة التي تصدر الصوت أو رد الفعل الفيزيائي لآذاننا وأمخاخنا عليها.

لكن تظل وجهة النظر المادية قائمة، وتظل المادة الركيزة عنصرًا ضروريًّا. تنتج الموسيقى عن جسيمات الهواء، وإذا تخلَّصْتَ من رد الفعل الميكانيكي لأُذُنِكَ تجاه الظواهر المادية، فلن تستمتع بالموسيقى بعد الآن (ففي الفضاء، لا يمكن لأحد سماع صراخك). الفكرة هي أن إدراكنا وفهمنا للموسيقى يتجاوز ذلك الوصف المادي، ولن يكون من الممكن تناوُل المسائل المتعلقة بكيفية إدراكنا كبشر للموسيقى إذا ركَّزنا فقط على الجزيئات المتذبذبة؛ إنَّ فهْم الموسيقى يتضمن تقديرَ الأوتار والأنغام، وافتقاد الإيقاع، وذلك على نحوٍ لا دخْل فيه إطلاقًا للجزيئات أو التذبذبات. رغم ذلك، فإن الموسيقى تتطلب وجود هذه التذبذبات، أو على الأقل الانطباع الحسي الذي تُخلفه في أمخاخنا.

على النحو ذاته، فَهْم المكونات الأساسية للحيوان ليس سوى خطوة واحدة فقط نحو استيعاب العمليات التي تتشكَّل منها الحياةُ، ولا يمكننا على الأرجح فهم كل شيء في هذا الشأن دون أن نتمتع بقدر أفضل من المعرفة عن المكونات التي تتجمع معًا لإحداث الظواهر التي نعرفها. إن الحياة «ظاهرة ناشئة» تتجاوز حدودَ مكوناتها الأساسية.

يندرج الوعي على الأرجح تحت هذه الفئة أيضًا، ورغم عدم وجود نظرية شاملة للوعي، فإن الأفكار والمشاعر متأصلة جوهريًّا في الخصائص الكهربية والكيميائية والفيزيائية للمخ، ويمكن للعلماء ملاحظة الظواهر الميكانيكية المادية المرتبطة بالأفكار والمشاعر في المخ، حتى إن لم يكن بإمكانهم التوصُّل إلى كيفية عمل هذه الظواهر. ووجهة النظر المادية هذه ضرورية، لكنها ليست كافيةً بالضرورة لفهم جميع الظواهر في عالمنا.

ما من شيء يضمن لنا فهم الوعي من خلال مكوناته الأساسية، لكن يظل بوسعنا التوصُّل إلى المبادئ التي تنطبق على نطاق مركب أو ناشئ أكبر بعض الشيء. وبفضل التقدم العلمي في المستقبل، سيتوصَّل العلماء لفهمٍ أدق للكيمياء الأساسية والقنوات الكهربية للمخ؛ ومن ثَمَّ سيفهمون المكونات العاملةَ الأساسية له. وسيُفسَّر الوعي في الغالب كظاهرة لن يستوعبها العلماء إلا من خلال التعرف على الأجزاء الصحيحة المكونة لها ودراستها.

يعني ذلك أن تحقيق التقدُّم لا يقتصر على علماء الأعصاب الذين يدرسون كيمياء المخ الأساسية، وإنما ثمة احتمال كبير أن يحقِّق اختصاصيو علم النفس التطوري — الذين يبحثون في جوانب الاختلاف بين تفكير البالغين والأطفال الرُّضَّع،[11] أو غيرهم ممَّن قد يتساءلون عن أوْجُه الاختلاف في التفكير بين البشر والكلاب — تقدُّمًا أيضًا. وأظن أن الوعي، شأنه شأن الموسيقى، لا يتكون من عنصر واحد فقط، وإنما له العديد من المستويات. ومن خلال طرح أسئلة على مستوًى أعلى، يمكننا اكتساب معلومات دقيقة عن الوعي نفسه، وعن الأسئلة التي يمكن طرحها عندما نبدأ في دراسة اللبنات المكونة له؛ أي العمليات الكيميائية والفيزيائية الخاصة بالمخ. وكما هو الحال مع السوفليه اللذيذ، يلزم علينا فهم النظم الناشئة أيضًا، لكن ما من فعل أو فكر بشري سيحدث دون أن يؤثِّر على بعض المكونات الفيزيائية في جسدنا.

والفيزياء — وإن كانت أقل غموضًا من نظرية الوعي — تحقِّق التقدم من خلال دراسة الظواهر في نطاقات مختلفة؛ فيطرح الفيزيائيون أسئلةً مختلفةً عند دراسة الأحجام والمكونات المتباينة. على سبيل المثال، تختلف الأسئلة التي نطرحها بشأن إرسال سفينة فضاء إلى المريخ اختلافًا تامًّا عن الأسئلة التي نطرحها عن كيفية تفاعل الكواركات. كِلا النوعين من الأسئلة مشروعٌ، لكن لا يمكننا استنتاج أحدهما من الآخَر. ومع ذلك، فإن المادة التي تُرسَل إلى الفضاء مصنوعة من المكونات الأساسية التي نطمح في فهمها في النهاية.

سمعت أحيانًا الناس يستهزئون بالمنظور المادي الذي يتبنَّاه الفيزيائيون، منتقدين إياه بوصفه منظورًا مخلًّا في التبسيط، ومشيرين إلى الظواهر التي لا — أو لن — نتناولها في إطاره. تتمثل هذه الظواهر أحيانًا في العمليات الفيزيائية أو الأحيائية، مثل عمل المخ أو الأعاصير، وأحيانًا تكون ظواهر روحانية، وأتحير قليلًا هنا بشأن ما يعنيه الناس، لكنني لا أملك سوى التأكيد على أننا لا نتناول هذه الظواهر بالفعل. فالنظريات الفيزيائية تركز على التركيب من أكبر النطاقات إلى أصغرها، وهي نطاقات يمكننا افتراضها أو دراستها من خلال التجارب. وبمرور الزمن، نكوِّن صورة مُتَّسِقَة حول كيفية الانتقال من أحد مستويات الواقع إلى مستوًى آخر. والعناصر الأساسية ضرورية لفهم الواقع، لكن العلماء الأَكْفَاء لا يصرُّون على أن معرفة هذه العناصر في حد ذاتها تفسِّر كلَّ شيء؛ فالتفسيرات تتطلب مزيدًا من البحث.

حتى إذا تمكَّنتْ نظرية الأوتار من تفسير الجاذبية الكمية، فستظل «نظرية كل شيء» تسميةً خاطئة مفزعة لها، وفي حال وصول الفيزيائيين — وهو الأمر المُستبعَد —

إلى هذه النظرية الأساسية الشاملة لكل شيء، سيظل علينا مواجهة العديد من الأسئلة بشأن الظواهر التي تقع على مستوى النطاقات الأكبر، تلك الظواهر التي لن يمكن الإجابة عليها ببساطة من خلال معرفة المكونات الأساسية. ولا يمكن للعلماء أن يطمحوا في تفسير المواد الفائقة التوصيل، والأمواج العاتية في المحيط، والحياة بوجه عام، إلا عندما يستوعبون الظواهر المُجمَّعة التي تظهر على نطاقات أكبر من تلك التي تصفها الأوتار الأولية. وفي أثناء ممارسة العلوم، سنتناول نطاقات الظواهر واحدًا تلو الآخَر، وسنبحث في الأجسام والعمليات على نطاق مسافات أكبر مما قد يمكننا تناوله إذا حاولنا تتبُّع كلِّ مكوِّنٍ من مكوناتها.

وبالرغم من تركيزنا على مستويات مختلفة من الواقع في أثناء تناولنا لأسئلة مختلفة، فلا ريب أن وجهة النظر المادية ضرورية. تعتمد الفيزياء وغيرها من العلوم على دراسة المادة الموجودة في العالم، والعلم في جوهره يعتمد على الأجسام التي تتفاعل نتيجةً للأسباب الميكانيكية وتأثيراتها. إن أيَّ شيءٍ يتحرك بسبب تأثير قوة ما عليه؛ فالمحرك يعمل بسبب استهلاكه للطاقة، والكواكب تدور حول الشمس بسبب تأثير الجاذبية، ووفقًا لوجهة النظر العلمية، يتطلب السلوك البشري أيضًا عمليات كيميائية وفيزيائية، حتى إن ظللنا بعيدين عن فهم كيفية عمله. ينبغي أن ترتبط خياراتنا الأخلاقية كذلك — على الأقل جزئيًّا — بجيناتنا؛ ومن ثَمَّ بتاريخنا التطوري؛ فالتركيب الفيزيائي يلعب دورًا في أفعالنا.

قد لا نتناول جميع الأسئلة المحورية مرة واحدة، لكن المادة الأساسية ضرورية دومًا للوصف العلمي. وفي نظر العالِم، العناصر الميكانيكية المادية هي أساس توصيف الواقع، والأسبابُ الفيزيائية ذات الصلة ضروريةٌ لأي ظاهرة في العالم، حتى وإن لم تكن كافيةً لتفسير كل شيء.

تتناسب وجهة النظر المادية هذه تمامًا مع العلم، لكنها تؤدي حتمًا إلى خلافات منطقية عندما يثير الدينُ فكرةَ الإله أو أي كيان آخَر خارجي لتفسير سلوك الناس أو العالم، وتكمن المشكلة هنا في أنه للإقرار بوجود كلٍّ من العلم والرب — أو أي روح خارجية — الذي يتحكم في الكون أو النشاط البشري، ينبغي للمرء التفكير في السؤال «متى يتدخل الإله؟ وكيف يفعل ذلك؟» وفقًا لوجهة النظر المادية الميكانيكية للعلم، إذا كانت الجينات التي تؤثِّر على سلوكنا هي نتاج التنوعات الجينية العشوائية التي تسمح للأنواع الحية بالتطور، فلا يمكن أن يكون الرب مسئولًا عن سلوكنا إلا إذا تدخَّلَ ماديًّا

بإنتاج تنوُّع جيني عشوائي من الناحية الظاهرية. ولتوجيه أنشطتنا الحالية، ينبغي أن يؤثِّر الرب على التحوُّل الجيني العشوائي ظاهريًّا، والذي لعب دورًا محوريًّا في تطوُّرنا. وإذا كان قد فعل ذلك، فكيف؟ هل استخدم قوةً معينة أو حوَّلَ طاقةً ما؟ هل يغيِّر الرب العمليات الكهربائية في عقولنا؟ هل يدفعنا للتصرُّف على نحو معين أو يحدث عاصفة رعدية كي لا يتمكَّن شخص معين من الوصول إلى وجهته؟ وعلى نطاق أوسع، إذا كان الرب قد جعل للكون هدفًا، فكيف يحقِّق إرادته؟

لا تكمن المشكلة هنا في أن جُلَّ هذا يبدو سخيفًا فحسب، وإنما أيضًا في أن هذه الأسئلة يبدو أن ليس لها أجوبة معقولة تتسق مع العلم كما نفهمه. كيف يمكن أن يعمل هذا «السحر الإلهي»؟

من الجليِّ أنَّ مَن يرغبون في الإيمان بأن الرب يمكنه التدخُّل لمساعدتهم أو تغيير العالم، عليهم في مرحلة ما الاستعانة بالتفكير غير العلمي. فحتى إن لم يكن العلم يوضِّح لنا بالضرورة الأسباب وراء حدوث الأشياء، فإننا نعلم بالفعل كيف تتحرك هذه الأشياء وتتفاعل، وإذا لم يكن للرب أي تأثير مادي، فلن تتحرك الأشياء، حتى أفكارنا التي تعتمد في النهاية على الإشارات الكهربائية التي تتحرك في عقولنا، لن تتأثر.

وإذا كانت هذه التأثيرات الخارجية متأصِّلة في الدين، فإن المنطق والتفكير العلمي يشيران إلى أنه لا بد أن تكون هناك آلية ينتقل بها هذا التأثير. إن الاعتقاد الديني أو الروحاني، الذي يتضمَّن قوةً غير مرئيةٍ لا يمكن التنبؤ بها لكنها تؤثِّر في الوقت نفسه على تصرفات البشر والعالم وسلوكياتهم؛ يُسفِر عن موقف لا يكون أمام المؤمن فيه خيار سوى التمسُّك بإيمانه والتخلِّي عن المنطق، أو بالأصح عدم الاكتراث به.

وإنني لأرى في هذا التنافر بين الدين والعلم مأزقًا منطقيًّا لا مخرجَ منه، سواء في الأساليب أو الفهم. و«المجالان غير المتداخلين»، اللذان زعم ستيفن جاي جولد وجودهما (بمعنى أن يتناول العلم الكَوْن التجريبي، في حين يتولَّى الدين المسائل الأخلاقية)، يتداخلان في حقيقة الأمر، بل يواجهان أيضًا تناقُضًا يتعذَّر حله. فمع أن المؤمنين قد يحيلون الأمور الأخلاقية بالفعل للدين، ومع أن العلم لا يزال عليه الإجابة عن بعض الأسئلة الجوهرية العميقة التي تُهِمُّ البشرية، فإننا عندما نتحدث عن المادة والنشاط — سواء أكان ذلك فيما يتعلق بالعقل أم الأجرام السماوية — يقع هذا في نطاق سلطة العلم.

خلافات عقلانية وحلول غير عقلانية

بالرغم مما أوضحناه فيما سبق، فإن التنافر بين العلم والدين لا يزعج بالضرورة جميعَ المؤمنين. تصادَفَ ذات مرةٍ أثناءَ وجودي على متن طائرة متجهة من بوسطن إلى لوس أنجلوس أنْ جلستُ بجوار ممثِّل شابٍّ تلقَّى في السابق تدريبًا في علم الأحياء الجزيئية، لكنه كانت لديه آراء غريبة بشأن التطور، وقبل أن يشرع في شق طريقه بمجال التمثيل، عمل مُنَسِّقًا لدروس العلوم مدة ثلاثة أعوام في المدارس الموجودة بالمدن. عندما التقيت به، كان عائدًا من مراسم تنصيب أوباما رئيسًا للولايات المتحدة، وكله حماس وتفاؤل ورغبة في تحويل العالم إلى مكان أفضل؛ فإلى جانب مواصَلَة مسيرته الناجحة كممثل، كان يطمح أيضًا في إقامة مدارس بجميع أنحاء العالم لتدريس العلم والمنهج العلمي.

لكن مناقشتنا تحوَّلَتْ تحوُّلًا عجيبًا آنذاك؛ فقد كان يخطِّط أن يحتوي المنهج الدراسي الذي ينوي تدريسه على مادة واحدة على الأقل عن الدين. كان الدين جزءًا مهمًّا في حياته، وكانت لديه ثقة في إصدار الناس أحكامهم الخاصة في هذا الشأن، لكن المفاجأة الكبرى هي أنه واصَلَ حديثه حول إيمانه بانحدار أصل الإنسان من آدم، وليس بتطوُّره. لم أفهم كيف يمكن لشخص حصل على تدريب في علم الأحياء ألَّا يؤمن بالتطور؛ هذا التناقض يفوق أي انتهاك لفكرة الكَوْن المادي بطرح فكرة تدخُّل الرب على النحو الذي تناولته فيما سبق. أخبرني الشاب بأن بإمكانه تعلُّم العلم وفهم المنطق، لكنهما لا يمثلان سوى الأسلوب الذي يعبِّر به الإنسان — أيًّا كان ما يعنيه ذلك — عن الأمور من حوله. ومن وجهة نظره، استنتاجات «الإنسان» المنطقية ليست كما تبدو عليه ظاهريًّا.

توصَّلْتُ من خلال هذه المحادثة إلى السبب الذي سيجعلنا نواجه صعوبة كبيرة في الإجابة عن الأسئلة المتعلقة بالتوافق بين العلم والدين؛ فالعلم القائم على التجربة والمُستمَد من المنطق وطبيعة الإيمان المُلهمة، منهجان مختلفان كل الاختلاف لمحاولة الوصول إلى الحقيقة! فما من تناقض بدون قواعد منطقية، والمنطق يحاول حل التناقضات، في حين أن أغلب الفكر الديني يقوم عليها. إذا كنتَ تؤمن بالحقيقة المُلهَمة، فأنت بهذا قد خرجت عن حدود قواعد العلم؛ ومن ثَمَّ لا يكون هناك تناقض. المؤمن بوسعه تفسير العالم على نحو غير عقلاني يرى — من وجهة نظره — أنه يتوافَق مع العلم؛ أي إن يقبل بفكرة «السحر الإلهي»، ويمكنه أن يقرِّر العيش في ظل التناقض، مثلما فعل رفيقي بالطائرة.

لكن إن كان بإمكان الدين تجنُّب التناقضات المنطقية، فلا يمكن للعلم أن يفعل ذلك؛ فمتبنُّو وجهة النظر الدينية، الذين يرغبون في قبول التفسيرات الدينية لكيفية

عمل العالم والتفكير العلمي، يضطرون لمواجهة الصدع الهائل بين الاكتشافات العلمية والتأثيرات غير الملحوظة وغير المُدرَكة، وهو الصدع الذي لا يمكن رَأْبُه بأساليب التفكير المنطقية، وليس أمامهم خيار سوى طرح التفسيرات المنطقية (أو على الأقل الحرفية) جانبًا في أمور الإيمان، أو على الأقل عدم الاكتراث بالتناقض.

وفي الحالتين، لا يزال من الممكن أن يكون المرء عالِمًا بارعًا. ولا ريب أن الدين قد يقدِّم لنا فوائد نفسية قيِّمة، لكن أي عالِم متدين سيكون عليه مواجهة صراع بين الجانب العلمي ومعتقده الديني يوميًّا؛ فالجانب الديني بمخك لا يمكنه العمل في الوقت نفسه مع الجانب العلمي؛ لأنهما ببساطة غير متوافقَيْن.

الفصل الرابع

البحث عن أجوبة

سمعت لأول مرة عبارة «الطَرْق على أبواب السماء» عند استماعي إلى أغنية بوب ديلان في حفلته عام ١٩٨٧ مع فرقة «جريتفول ديد» في أوكلاند بولاية كاليفورنيا. وغني عن القول هنا أن عنوان هذا الكتاب له مقصد مختلف عن كلمات هذه الأغنية التي لا تزال تتردَّد في ذهني بصوت ديلان وجيري جارسيا إلى الآن. تختلف العبارة عن أصلها في الكتاب المقدَّس أيضًا، وإن كان عنوان الكتاب يرمز ضمنيًّا إلى هذا التفسير. في إنجيل متى آية نصها: «اسألوا تُعطَوا. اطلبوا تجدوا. اقرعوا يُفتَح لكم؛ لأن كل مَن يسأل يأخذ، ومَن يطلب يجد، ومَن يقرع يُفتَح له.»[1]

استنادًا إلى هذه الكلمات، يمكن للإنسان البحث عن المعرفة، لكن الهدف الأخير هو الوصول إلى الرب. إن فضول الناس بشأن العالم، واستفسارهم الدائم ليس سوى خطوات يخطونها نحو الرب، بل الكَوْن نفسه أمر ثانوي. قد تكون الإجابات في متناول المؤمن، أو قد يُدفَع إلى مزيد من السعي الحثيث نحو الحقيقة، لكن بدون الرب، تصير الحقيقة غير قابلة للوصول إليها أو لا تستحق السعي إليها؛ فالإنسان لا يمكنه فعل ذلك وحده، والفيصل في ذلك ليس له.

يشير عنوان كتابي إلى فلسفة العلم وأهدافه المختلفة. لا يتعلق العلم بالفهم والاعتقاد السلبي، والوصول إلى حقيقة الكَوْن غاية في حد ذاتها. يسعى العلماء بنشاط نحو المعرفة، وهي حدود ما نعلمه؛ فنحن نسأل ونستكشف، ونغيِّر آراءنا عندما تجبرنا الحقائق والمنطق على فعل ذلك، ولا نثق إلا فيما يمكننا إثبات صحته بالتجارب، أو فيما يمكننا استنتاجه من الفرضيات المثبتة تجريبيًّا.

يتمتَّع العلماء بقدر كبير من المعرفة بالكَوْن، لكنهم يعلمون في الوقت نفسه أنه لا يزال هناك الكثير من الأمور التي عليهم إدراكها؛ لا يزال هناك العديد من الأمور

التي لم تتوصَّل إليها التجارب الحالية، بل وأي تجربة يمكننا أن نحلم بها. لكن رغم هذه القيود، يسمح لنا كل اكتشاف جديد بالصعود درجة أخرى على السلم المؤدي إلى الحقيقة، وأحيانًا يمكن أن تغيِّر خطوة واحدة من نظرتنا للعالم تغييرًا جذريًّا. ورغم إدراك العلماء أن تطلُّعاتهم الطموحة لا تتحقَّق دومًا، فإنهم يتقدَّمون بخطى ثابتة للوصول إلى فهم أعمق، مع تيسير التطورات التكنولوجية لهم الوصولَ إلى قدر أكبر من مكونات العالم، ويبحث العلماء بعد ذلك عن نظريات أكثر شمولًا يمكنها استيعاب أي معلومات مُكتسَبة جديدة.

السؤال المهم إذن هو: مَن لديه القدرة — أو الحق — في البحث عن إجابات؟ هل يبحث الناس عنها بأنفسهم، أم يثقون في سلطات أعلى في فعل ذلك؟ قبل الخوض في الحديث عن الفيزياء، سأختتم هذا الجزء من الكتاب بعرض أَوْجُه الاختلاف بين وجهتَيِ النظر العلمية والدينية.

مَن صاحب السلطة؟

رأينا فيما سبق كيف أن ظهور التفكير العلمي في القرن السابع عشر أسفَرَ عن انقسام الموقف المسيحي من المعرفة؛ وهو ما أدَّى إلى صراعٍ بين الأطر المفاهيمية المختلفة لا يزال يفرض نفسه حتى الآن. لكن ثمة سببًا آخَر أدَّى إلى الانقسام بين العلم والدين؛ ألا وهو السلطة؛ ففي نظر الكنيسة، كان ادعاء جاليليو بأن بوسعه التفكير بنفسه وافتراضه قدرته على فهم الكون بشكل مستقل انحرافًا عن المعتقد الديني المسيحي.

عندما ابتكر جاليليو المنهج العلمي، رفض الامتثال للسلطة وفضَّلَ إجراء الملاحظات وتفسيرها بنفسه، وكان يغيِّر آراءه وفقًا لهذه الملاحظات؛ وبفعل ذلك أطلَقَ جاليليو العِنان لأسلوب جديد تمامًا في تناول المعرفة بشأن العالم، وهو الأسلوب الذي من شأنه أن يؤدِّي إلى فهم أفضل للطبيعة وتأثير أكبر عليها. لكن رغم نشر جاليليو لأهم ما حقَّقه من إنجازات (أو بالأحرى بسبب ذلك)، زُجَّ به في السجن، فمثَّلت صراحته في استنتاجه بشأن النظام الشمسي — بقوله إن الأرض ليست مركز الكون — تهديدًا للقوى الدينية آنذاك ولتفسيرها المتشدِّد للكتاب المقدس. ومع وجود جاليليو وغيره من المفكِّرين المستقلين، الذين شاركوا في الثورة العلمية، صار أيُّ تفسير حرفي للكتاب المقدَّس حول طبيعة الكَوْن وأصله وسلوكه، عرضةً للتفنيد.

كان توقيت جاليليو سيِّئًا بوجه خاص؛ لأن ادعاءاته المتطرفة تزامَنَتْ مع ذروة الإصلاح المضاد، وهو رد فعل الكنيسة الكاثوليكية على التوجهات البروتستانتية. استشعرت العقيدة الكاثوليكية تهديدًا خطيرًا في تأييد مارتن لوثر للتفكير المستقل وتفسير الكتاب المقدَّس بالنظر مباشَرةً إلى النص بدلًا من التسليم بتفسير الكنيسة. وقد دعم جاليليو آراء لوثر، بل تمادى أيضًا فيها بعض الشيء؛ فرفض السلطة، وعارَضَ بوضوح التفسير الكاثوليكي للنصوص الدينية.[2] واستندت مناهجه العلمية المعاصرة على الملاحظات المباشرة للطبيعة التي حاوَلَ آنذاك تفسيرها باستخدام أدق الفرضيات التي يمكن إرجاع النتائج إليها. ورغم إخلاص جاليليو للكنيسة الكاثوليكية، كانت أفكاره ومناهجه الفضولية مشابهةً كثيرًا للتفكير البروتستانتي في نظر رجال الدين؛ وبذلك دخل جاليليو في حرب بين السلطات الدينية دون قصد منه.

المثير للسخرية أنه رغم ما سبق، تسَرَّعت حركة الإصلاح المضاد دون قصد في اعتناق فكرة كوبرنيكوس بمركزية الشمس في الكون؛ فقد أرادت الكنيسة الكاثوليكية ضمان موثوقية تقويمها لتتم الاحتفالات في الوقت الصحيح من العام، وإجراء مراسمها على نحو سليم؛ ومن ثَمَّ كان كوبرنيكوس أحد علماء الفلك الذين طلبت منهم الكنيسة محاوَلَةَ إصلاح التقويم اليولياني ليكون أكثر توافقًا مع حركة الكواكب والنجوم، وكان ذلك البحث بعينه هو الذي قاد كوبرنيكوس إلى ملاحظاته؛ ومن ثَمَّ إلى ادعاءاته الثورية.

لم يوافِق لوثر نفسه على نظرية كوبرنيكوس، لكن ذلك كان موقفَ أغلبِ الناس أيضًا إلى أن أثبتت ملاحظاتُ جاليليو المتقدمة، ونظريةُ الجاذبية لنيوتن بعد ذلك، صحةَ هذه النظرية. لكن لوثر قبل التطورات الأخرى التي شهدها مجالَا الطب والفلك، والتي رآها مُتَّسِقَة مع نظرته المتفتحة للطبيعة؛ لم يكن لوثر مناصرًا عظيمًا للعلم، لكن الإصلاح شكَّلَ أسلوبًا للتفكير — مناخًا تتم في إطاره مناقشةُ الأفكار الجديدة وقبولها — شجَّعَ على ظهور الأساليب العلمية الحديثة. وبفضل التطور في الطباعة، تمكَّنَت أيضًا الأفكار العلمية والدينية على حدٍّ سواء من الانتشار سريعًا والحدِّ من سلطة الكنيسة الكاثوليكية.

رأى لوثر أن المساعي العلمية العلمانية لا تقل أهميتها عن المساعي الدينية، وقد تبنَّى العلماءُ — من أمثال الفلكي الشهير يوهانز كبلر — الرأيَ ذاته، فكتب كبلر إلى أستاذه السابق في توبينجن، مايكل ميستلين: «أردتُ أن أكون عالِم دينٍ، لكنني ظللتُ متردِّدًا لفترة طويلة. أما الآن، فأشهدُ من خلال جهودي مقدارَ الاحتفاءِ بالرب في مجال علم الفلك.»[3]

من هذا المنظور، يمكن القول إن العلم كان وسيلةً للاعتراف بالطبيعة المذهلة للرب وخلقه، والاعتراف بحقيقة التنوع الهائل للتفسيرات التي تتناول عمل الأشياء المختلفة. لقد صار العلم وسيلةً لتحقيق فهم أفضل للكَوْن المنطقي والمُنظَّم الذي خلقه الرب؛ ومن ثَمَّ مساعدة البشرية. الجدير بالذكر أن العلماء المعاصرين الأوائل لم ينبذوا الدين، وإنما على العكس تمامًا فسَّروا أبحاثهم بأنها نوع من تمجيد لخَلق الرب، وقد نظروا لكتاب الطبيعة وكتاب الرب كسبيلين للتهذيب والتنوير. وكانت دراسة الطبيعة من هذا المنظور نوعًا من الامتنان والتقدير للخالق.

وقد شهدنا وجهة النظر هذه في عهد أحدث أيضًا؛ فنجد الفيزيائي الباكستاني، محمد عبد السلام، في الخطاب الذي ألقاه عند تلقِّيه جائزة نوبل عام ١٩٧٩ تقديرًا لدوره في إنشاء «النموذج القياسي» لفيزياء الجسيمات، يقول: «لقد أكَّدَ رسول الإسلام العظيم على أن طلب المعرفة والعلم أمر إلزامي على كل مسلم، رجلًا كان أم امرأة، وأمر الصحابة بطلب العلم ولو في الصين. ومن الجلي أنه كان يقصد في حديثه هنا المعرفة العلمية، وليس الدينية، بالإضافة إلى أن هذه الكلمات كانت تأكيدًا على التعاون بين الأمم في طلب العلم.»

لماذا يهتم الناس؟

بالرغم من الاختلافات الأساسية الموضَّحَة في الفصل السابق، يرحِّب بعض المؤمنين بتطبيق الجانبين العلمي والديني في عقولهم على نحو منفصل، والاستمرار في اعتبار فهم الطبيعة وسيلةً لفهم الرب. وكثيرون ممَّن لا يسعون بِكدٍّ لتحصيل العلم يسعدهم في الوقت نفسه السماحُ للتقدُّم العلمي بالاستمرار دون أي قيود، لكن يظل الانقسام بين العلم والدين قائمًا لدى الكثيرين في الولايات المتحدة ومناطق أخرى بالعالم، ويمتد أحيانًا إلى مرحلةٍ يُسفِر فيها عن عنف أو على الأقل تدخُّل في التعليم.

من وجهة نظر السلطة الدينية، الأمور التي تتحدى الدين مثل العلم تكون مريبةً للعديد من الأسباب، من بينها ما لا علاقة له بالحقيقة أو المنطق. ومن وجهة نظر أصحاب السلطة، يمكن دومًا استخدام الدين كورقة رابحة تبرِّر وجهة نظرهم. إن أي بحث مستقل من أي نوع يمكن أن يمثِّل بوضوح تهديدًا محتملًا لهم؛ فالتعمق في البحث في أسرار الإله قد يُقوِّض السلطة الأخلاقية للكنيسة والسلطة الدنيوية للحكَّام على الأرض، ويمكن لمثل هذه الأبحاث أيضًا التدخُّل في التواضع والولاء المجتمعي، وأن

تُسفِر أيضًا عن نسيان أهمية الرب. لا عجب، إذن، من قلق السلطات الدينية أحيانًا من هذا الشأن.

لكن لماذا يتبنَّى الأفراد وجهة النظر هذه؟ إن السؤال الحقيقي في نظري ليس هو: ما أوْجُه الاختلاف بين العلم والدين؟ إذ يمكن تحديد هذه الاختلافات مثلما أوضحنا في الفصل السابق، وإنما الأسئلة المهمة التي ينبغي الإجابة عنها هي: لماذا يهتم الناس إلى هذا الحد؟ ولماذا يشكُّ الكثير من الناس في العلماء والتقدُّم العلمي؟ ولماذا ينشأ هذا الصراع على السلطة كثيرًا ويستمر حتى يومنا هذا؟

أُدرِج اسمي مصادفةً ذات مرة في اللائحة البريدية لمؤتمر المائدة المستديرة بكامبريدج للعلم والفن والدين، وهو سلسلة من المناقشات بين أعضاء جامعة هارفرد ومعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، وأول مناقشة حضرتُها دار موضوعها حول شاعر القرن السابع عشر جورج هربرت والملحدين الجُدُد، وساعدت هذه المناقشة في إلقاء بعض الضوء على بعضٍ من هذه الأسئلة.

كان ستانلي فيش، الباحث الأدبي الذي صار بعد ذلك أستاذًا في القانون، المتحدث الرئيسي في المناقشة. بدأ ستانلي ملاحظاتِه بتلخيص آراء الملحدين الجُدُد وعدائهم للإيمان الديني. والملحدون الجُدُد هم مؤلفون من أمثال كريستوفر هيتشنز، وريتشارد دوكينز، وسام هاريس، ودانيال دينيت، هاجموا الدين بكلمات ناقدة لاذعة في كتبهم الأكثر بيعًا.

وبعد هذا التوضيح الملخِّص لآرائهم، واصَلَ فيش حديثه بنقده افتقارَ فهم هذه الجماعة للدين، وهو الرأي الذي راقَ للحضور؛ إذ أعتقدُ أنني كملحدة كنتُ من بين الأقلية في المناقشة. ذهب فيش إلى أن الملحدين الجُدُد كان بوسعهم التمتُّع بموقف أقوى إذا وضعوا في الاعتبار تحديات الاعتماد على الذات التي يلزم على المخلصين دينيًّا التغلُّب عليها.

إن الإيمان يستلزم بحثًا نَشِطًا، ويشير الكثير من الأديان إلى ضرورة أن يتسم الإيمان بالوعي. لكن في الوقت نفسه، ينادي العديد من الأديان — بما في ذلك بعض فروع البروتستانتية — برفض الإرادة المستقلة أو قمعها؛ فنجد كالفن يقول: «ينزع الإنسان بطبيعته إلى الإعجاب المُضلِّل بذاته. وهنا يكمن ما تطْلُب منا الحقيقةُ الإلهية السعيَ من أجله في دراستنا لأنفسنا: إنها تطلب منا نوع المعرفة التي تجردنا من أي ثقة لدينا في قدرتنا، وتحرمنا من أي فرصة للتباهي، وتقودنا إلى الخضوع والامتثال.»[4]

انطبقت هذه الكلمات تحديدًا بشكل أساسي على المسائل الأخلاقية، لكن الإيمان بضرورة وجود إرشاد خارجي أمرٌ غير علمي، وقد يكون من الصعب تحديد الخط الفاصل في هذا الشأن.

يتردَّد كثيرًا في المؤلفات الدينية ذِكْرُ الصراعِ بين الرغبة في المعرفة وعدم الثقة في الاعتداد البشري بالنفس، ومن الأمثلة على ذلك قصائدُ هربرت التي ناقشها فيش والمشاركون في مؤتمر المائدة المستديرة. تناولت هذه المناقشة صراعات هربرت الداخلية بشأن علاقته بالمعرفة وبالرب؛ رأى هربرت أن الفهم النابع من الذات علامة على الكبرياء الآثِم. وتظهر تحذيرات مماثلة كذلك في كتابات جون ميلتون؛ فرغم إيمانه الراسخ بضرورة البحث الفكري النَّشِط، نجد الملاك رافائيل يخبر آدم في قصيدة «الفردوس المفقود» لجون ميلتون بأنه لا ينبغي أن يبحث بفضول شديد في حركة النجوم؛ لأنها «ليست بحاجة لإيمانه».

المثير للدهشة (على الأقل في نظري) أن الممثلين المرموقين في المجموعة التي كنتُ بينها من أساتذة هارفرد ومعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا بمؤتمر المائدة المستديرة وافَقُوا على محاولات هربرت لإنكار الذات، إيمانًا منهم بأن قمع فردية المرء وامتثاله لهذه القوى العظمى أمر طيب (وأي شخص يعرف أساتذة هارفرد ومعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا سيندهش أيضًا بهذا الإنكار المزعوم للذات).

لعل السؤال «هل يمكن للإنسان الوصولُ إلى الحقيقة بنفسه دون مساعدة؟» هو جوهر الصراع بين الدين والعلم؛ فهل من الممكن أن يكون أحد الأسباب في المواقف السلبية تجاه العلم التي نشهدها حاليًّا هو المعتقدات شديدة التطرف، التي عبَّر عنها هربرت وميلتون؟ فنحن لسنا بصدد مناقشة كيفية نشوء العالم بقدر ما نحن بصدد مناقشة مَن له الحق في إجراء الاكتشافات، وأي النتائج يجب أن نثق فيها.

يتسم الكون بالتواضع؛ إذ تخفي الطبيعةُ الكثيرَ من أسرارها المثيرة، لكنَّ تعجرُفَ العلماء يصل بهم إلى الحد الذي يؤمنون معه بأن بوسعهم فكَّ طلاسمِ هذه الأسرار بأنفسهم؛ فهل يكون البحثُ عن إجابات تجديفًا؟ أم مجرد تعجرُفٍ؟ وصف أينشتاين، وكذلك ديفيد جروس الفيزيائي الحاصل على جائزة نوبل، العلماءَ بأنهم يعتقدون أنهم يتصارعون مع الرب للوصول إلى إجابات عن الأسئلة المهمة المتعلقة بكيفية عمل الطبيعة. لا شك أن ديفيد لم يقصد المعنى الحرفي لهذا الكلام (وبالتأكيد لم يقصد أنهم متواضعون أيضًا)، لكنه كان يؤمن بقدرتنا المذهلة على إدراك العالم من حولنا.

لا يزال هذا الافتقار إلى الثقة في قدرتنا على اكتشاف الأشياء بأنفسنا يفرض نفسه في جوانب أخرى أيضًا، فيظهر في الدعاية والأفلام والكثير من شئون الحياة السياسية الآن. والإخلاص للحقائق واحترامها لم يَعُدْ رائجًا بعض الشيء في عصرنا المتسم بالسخرية وأحيانًا بمعارضة التفكير المنطقي. ومن المذهل بحق ما يمكن أن يصل إليه بعض الناس من إنكار لنجاحات العلم. ذات مرة التقيتُ في حفل بسيدة أَكَّدَتْ لي بإصرار على أنها لا تؤمن بالعلم، فسألتها ما إذا كانت قد وصلت للدور الحادي عشر باستخدام المصعد الذي استخدمتُه أنا أيضًا أم لا. هل يعمل هاتفها؟ وهل وصلَتْ إليها الدعوة الإلكترونية للحفل؟

لا يزال الكثير من الناس يرون من المحرج — أو من الغريب على أفضل الأحوال — تناوُل الحقائق أو المنطق بجدية، ولعل من الأمور التي تدفع لمناهضة العلم والتفكير المنطقي هو الاستياء من غرور مَن يشعر بأنه على القدر الكافي من القدرة على دراسة العالم. ومَن لديهم شعور دفين بأنه ليس من حقنا خوض التحديات العقلية العسيرة، يؤمنون بأن هذا العمل يفوق ما نتمتع به من قوة. ولا نزال نشهد هذا الموقف العجيب من إنكار الذات ومناهضة التقدُّم على جميع الأصعدة.

يرى البعض أن فكرة إمكانية كشف أسرار العالم تبعث على التفاؤل، وتؤدي إلى مزيد من الفهم والتأثير. لكن البعض الآخَر يرى أن العلم والسلطات العلمية، التي تتميَّز بقدر أكبر من المعرفة والمهارة في هذه المجالات التقنية، تثير المخاوف؛ فينقسم الناس إلى مَن يشعر بأنه مؤهَّل للاشتراك في الأنشطة العلمية وتقييم النتائج العلمية، ومَن يشعر بالضعف أمام الفكر العلمي؛ ومن ثَمَّ ينظر إلى مثل هذه المحاولات على أنها نوع من الغرور.

يرغب أغلب الناس في الشعور بالتمكين والانتماء، والسؤال الذي يواجِهُه أي شخص في هذا الشأن هو: أيهما يمنحك شعورًا أقوى بالتحكم في العالم: العلم أم الدين؟ أين يمكنك العثور على الثقة والراحة والتفهم؟ هل تفضِّل الإيمانَ بأن بوسعك اكتشاف الأشياء وحدك، أم إنك تثق على الأقل في غيرك من البشر في فعل ذلك؟ يرغب الناس في إجابات وإرشادات لم يمكن للعلم توفيرها بعدُ.

ومع ذلك، فقد قدَّمَ لنا العلم الكثير من المعلومات بشأن ماهية مكونات الكَوْن وكيفية عمله. وعندما تجمع بين كل ما لدى العلماء من معارف، تتشكَّل الصورة التي استنتجها العلماء بمرور الزمن على نحو جيد، فالأفكار العلمية تؤدي إلى تنبؤات

صحيحة؛ ومن ثَمَّ يثق بعضنا في سلطتها، ويدرك الكثيرون الدروسَ المهمة للعلم بمرور الزمن.

يتجاوز دائمًا العلماء الحدس البشري عند استكشافهم المناطقَ التي لا يمكنهم الوصول إليها مباشَرةً، ولا يزال علينا أن نتوصَّل إلى الاكتشافات التي تُعِيد الإنسانَ إلى وضعه المركزي في وصفنا للعالم. فثورة كوبرنيكوس تفرض نفسها علينا بشكل متواصل، مع إدراكنا أننا لسنا سوى مجموعة واحدة من بين العديد من مجموعات الأجسام، وهذه المجموعة ذات حجم عشوائي وفي مكان عشوائي في كَوْن يبدو — من وجهة النظر العلمية — أنه يعمل بعشوائية.

إن فضول الإنسان، وقدرته على تحقيق التقدُّم في سبيل إرضاء هذا النهم لتحصيل المعرفة، يجعلانه كائنًا متميزًا بلا شك؛ فهو الكائن الوحيد القادر على طرح الأسئلة والسعي الحثيث للوصول لأجوبة. فنحن نتساءل، ونتفاعل، ونتواصل، ونفترض، ونستقي استنتاجات مجردة، وفي النهاية نصل إلى وجهة نظر أعمق للكون ومنزلتنا فيه.

لا يعني ذلك بالضرورة أن العلم سيجيب عن جميع الأسئلة، فمن يظنون أن العلم سيحل كل مشكلات الإنسان، هم — على الأرجح — مخطئون أيضًا. لكن ما يعنيه ذلك هو أن طلب العلم كان — ولا يزال — مسعًى جديرًا ببذل الجهد والعرق في سبيله. إننا لا نعرف إلى الآن كلَّ الإجابات، ومَن لديهم نزعة علمية — سواء أكان لديهم إيمان ديني أم لا — يحاولون سبر أغوار الكَوْن والبحث عن هذه الإجابات. ويتناول الجزء الثاني من هذا الكتاب ما توصَّلَ إليه هؤلاء الآن، وما يلوح في الأفق من اكتشافات أخرى.

الجزء الثاني

تقدير نطاق المادة

الفصل الخامس

الرحلة الغامضة الساحرة

لعل الفيلسوف الإغريقي ديموقريطس كان محقًّا في بداية عمله عندما افترَض وجود الذرات منذ ألفين وخمسمائة عام مضت، لكن ما كان لأحد أن يخمِّن آنذاك بدقة ما ستكون عليه المكونات الأولية الفعلية للمادة. وبعض النظريات الفيزيائية، التي تنطبق على المسافات الصغيرة، مناقِضة تمامًا للبديهة، ولولا أن التجارب أجبرت العلماء على قبول أسسها المنطقية الجديدة والمحيِّرة، ما كانت هذه النظريات لتخطر ببال أكثر الناس إبداعًا وسعةً في الأفق. وجدير بالذكر أنه ما إن امتلك علماء القرن الماضي التكنولوجيا اللازمة لسَبْر أغوار النطاقات الذرية، حتى توصَّلوا إلى أن البنية الداخلية للمادة تخالِف دومًا التوقعات، فالأجزاء المختلفة للمادة تتوافَق معًا على نحو يفوق في سحره أي شيء قد يتم توفيقه عمدًا.

من العسير على أي إنسان تكوينُ صورةٍ مرئية دقيقة لما يحدث على مستوى النطاقات الدقيقة التي يدرسها فيزيائيو الجسيمات حاليًّا؛ فالمكونات الأولية التي تتَّحِدُ معًا لتكوين ما نعتبره مادةً مغايرةٌ تمامًا لما ندركه مباشَرةً باستخدام حواسنا، وتخضع هذه المكونات في عملها أيضًا لقوانين فيزيائية غير مألوفة، وكلما تضاءَلَ حجم النطاقات، بدا أن المادة تخضع لخصائص مختلفة تمامًا، الأمر الذي يجعلها تبدو كما لو كانت تنتمي إلى أكوان مختلفة كليةً.

وقدر كبير من الارتباك الذي يكتنف محاولة فهم هذه البنية الداخلية الغريبة، إنما مرَدُّهُ الافتقارُ إلى معرفة المكونات المختلفة التي توجد في النطاقات والأحجام العديدة التي يسهل انطباق النظريات المختلفة عليها. فنحن بحاجة لمعرفة ما هو موجود، وإدراك الأحجام والنطاقات التي تصفها النظريات المختلفة لكي نصل إلى فهم كامل للعالم المادي.

في جزء لاحق من هذا الكتاب، سنتناول الأحجامَ المختلفة المرتبطة بالفضاء، الذي يمثِّل الحدَّ النهائي لنا. لكن قبل الانتقال إلى هذه النقطة، سنوجِّه تركيزَنا في هذا الفصل إلى الداخل، وسنشرع في الحديث عن النطاقات المعروفة، ثم ننتهي بالجزء الداخلي العميق من المادة الذي يمثِّل الحدَّ النهائي لنا، لكن من الجانب الآخَر. ستبدأ رحلتنا بنطاقات الأطوال التي نواجهها عادةً، مرورًا بالأجزاء الداخلية للذرة (حيث تلعب ميكانيكا الكم دورًا مهمًّا)، ووصولًا إلى نطاق بلانك (الذي تلعب فيه الجاذبية دورًا لا يقل أهميةً عن القوى الأخرى المألوفة)، وسنستكشف خلال ذلك ما وصلت إليه معرفتنا بالفعل، وكيفية ارتباط كل هذه النطاقات بعضها ببعض. لنبدأ الآن رحلتنا في هذا العالم الداخلي الخلَّاب الذي عمد الفيزيائيون المغامرون وآخَرون إلى فكِّ طلاسمه على مرِّ الزمان.

تقدير نطاق الكَوْن

تبدأ رحلتنا بالنطاقات البشرية؛ أي تلك التي نراها ونلمسها في حياتنا اليومية، وليس محض صدفة أن يكون المتر — وليس الواحد على المليون من المتر، أو العشرة آلاف متر — هو المقياس المُستخدَم في التعبير عن حجم الإنسان؛ فالمتر يساوي ضعف حجم الطفل الرضيع، ونصف حجم الرجل الناضج، وما كان سيُعَدُّ غريبًا حقًّا أن نكتشف أن الوحدة الأساسية التي نستخدمها في القياسات المعتادة تساوي واحدًا على المائة من حجم مجرة درب التبانة أو طول ساق النملة.

رغم ذلك، فإن أي وحدة فيزيائية معيارية تُحدَّد وفقًا لأي شخص بعينه لن يكون لها أي فائدة؛ لأن معيار القياس ينبغي أن يكون طولًا يتفق عليه الجميع ويفهمونه.[1] لذا، وضعت الأكاديمية الفرنسية للعلوم في عام ١٧٩١ معيارًا للقياس، وعُرِّف المتر بأنه إما طول بندول يبلغ نصف مدة هزته ثانية واحدة، أو عُشْر مليون ربع طول خط الطول (وربع طول خط الطول هو المسافة بين خط الاستواء والقطب الشمالي).

لا يمُتُّ أيٌّ من هذين التعريفين بأي صلة لنا نحن البشر. حاوَلَ الفرنسيون إيجادَ مقياس موضوعي يمكننا جميعًا الاتفاق عليه وتقبُّله، وقد وقع اختيارهم على التعريف الثاني لتجنُّب أي شكوك يفرضها الاختلاف الطفيف في قوة الجاذبية على سطح الأرض.

وهذا التعريف اعتباطي، فقد وُضِع لجعل مقياس المتر دقيقًا ومعياريًّا ليتَّفِق عليه الجميع، لكن الرقم عُشْر المليون لم يأتِ مصادفةً؛ ففي ظل التعريف الفرنسي الرسمي للمتر، من السهولة بمكان على الشخص العادي أن يمسك في يده عصا القياس المترية.

يبلغ طول معظمنا أقل قليلًا من مترين، لكن ما من أحد منَّا يبلغ طوله عشرة أمتار، أو حتى ثلاثة. فالمتر نطاق بشري؛ وعندما يقع حجم الأشياء في هذا النطاق، نتقبلها جيدًا، على الأقل إلى الحد الذي يمكننا ملاحظتها والتفاعل معها في إطاره (وإنْ كنَّا سنبتعد، بالتأكيد، عن التماسيح المُقدَّر طولها بالأمتار). ونحن على علم بقواعد الفيزياء السارية؛ نظرًا لأنها القواعد التي نشهدها في حياتنا اليومية. ويستند حدسنا إلى عمرنا الكامل الذي قضيناه في ملاحظة الأشياء والناس والحيوانات التي يمكن وصف حجمها على نحو معقول بالأمتار.

كَمْ يذهلني أحيانًا مدى محدودية منطقة الراحة التي نعيش داخلها. على سبيل المثال، لاعب كرة السلة الأمريكي، يواكيم نواه، هو صديق لأحد أقاربي، ولا نَملُّ أبدًا أنا وعائلتي من التعليق على طوله طوال الوقت، فنطَّلِع دومًا على الصور أو العلامات المحددة لطوله على أُطُر الأبواب على مدار سنوات عمره، ونبدي إعجابنا بكيفية إعاقته لرمية لاعب آخَر أصغر منه حجمًا. يواكيم طويل على نحو يجعل الجميع يتسمَّرُ أمامه، لكن الحقيقة هي أن طوله لا يزيد عن متوسط طول الآخَرين إلا بنسبة ١٥ في المائة فقط، وآلية عمل جسمه مماثلة لآلية عمل أي جسم آخَر. وقد تختلف النِّسَب المحددة، مما يمنح يواكيم ميزة ميكانيكية أحيانًا، ولا يمنحه إياها أحيانًا أخرى، لكن القواعد التي تتبعها عظامه وعضلاته هي نفسها القواعد التي يتبعها جسم أيٍّ منَّا.

لا تزال قوانين الحركة التي وضعها نيوتن في عام ١٦٨٧ توضِّح لنا ما يحدث عند التأثير على كتلة معينة بقوة ما. تسري هذه القوانين على العظام في جسمك، وعلى الكرة التي يُلقِيها يواكيم أيضًا، وباستخدام هذه القوانين يمكننا حساب مسار الكرة التي يرميها يواكيم هنا على سطح الأرض، والتنبؤ بالمسار الذي يسلكه كوكب عطارد عند دورانه حول الشمس. وعلى جميع هذه الأصعدة، توضِّح لنا قوانين نيوتن أن الحركة ستستمر بنفس السرعة إلا في حالة التأثير على الجسم بقوة ما؛ فهذه القوة من شأنها تعجيل حركة الجسم حسب كتلته، فلكل فعل رد فعل مساوٍ له في القوة ومضاد له في الاتجاه.

تسري قوانين نيوتن على نحو ممتاز على نطاقات الأطوال والسرعات والكثافات التي ندركها جيدًا، ولا تظهر التناقضات إلا في نطاق المسافات الصغيرة للغاية حيث تغيِّر ميكانيكا الكم القواعد، أو على السرعات العالية للغاية حيث تُطبَّق النسبية، أو على الكثافات الهائلة مثل تلك الموجودة في الثقوب السوداء حيث تكون الغلبة للنسبية العامة.

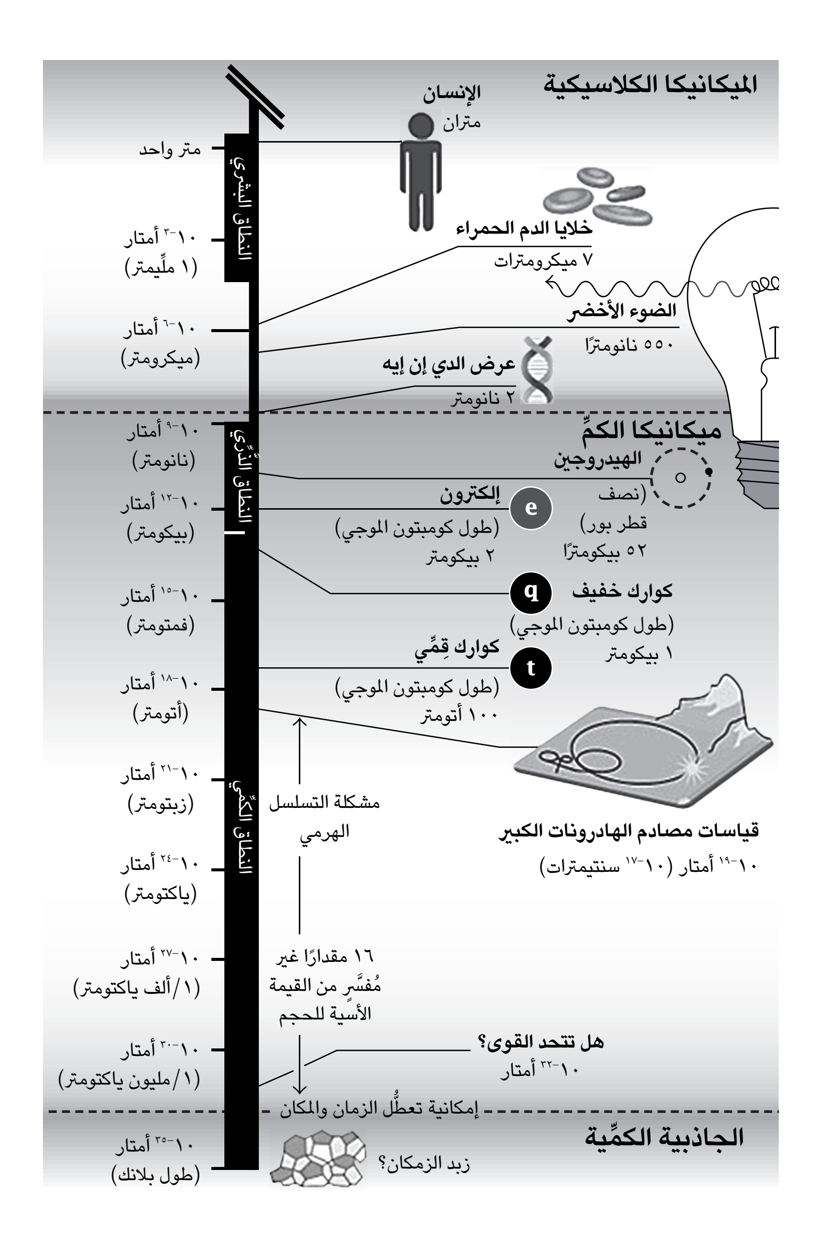
وآثار أي من النظريات الجديدة، التي تدحض قوانين نيوتن، ضئيلة للغاية، حتى إنه لا يمكن ملاحظتها في نطاق المسافات أو السرعات أو الكثافات المعتادة، لكن مع التصميم والتكنولوجيا، يمكننا الوصول إلى النُّظُم التي نواجِه فيها هذه القيود.

رحلة نحو الداخل

علينا التوغُّل إلى أعماقٍ أبعدَ غورًا في رحلتنا قبل أن نتمكَّنَ من التعرُّف على المكونات الفيزيائية الجديدة والقوانين الفيزيائية الحديثة. لكن ثمة أمورًا كثيرة تحدث في إطار النطاقات الممتدة ما بين المتر وحجم الذرة، والعديد من الأجسام التي نراها في حياتنا اليومية، وفي الحياة بوجه عام، تتمتع بميزات مهمة لا يمكننا ملاحظتها إلا عند استكشافنا نُظُمًا أصغر حجمًا تسود فيها سلوكيات وبنى ثانوية مختلفة (انظر الشكل ٥-١ للاطِّلَاع على بعض النطاقات التي نتناولها في هذا الفصل).

لا ريب أن العديد من الأجسام التي نعرفها يتشكَّل عن طريق تراكم الوحدات الأساسية الفردية له، بالإضافة إلى قدر ضئيل من التفاصيل أو البنية الداخلية ذات الأهمية، وهذه «النظم الشاملة» تنمو مثل الحوائط المكوَّنة من لبنات متعددة، فبوسعنا تكبير حجم الحوائط أو تصغيره عن طريق إضافة اللبنات أو إنقاصها، لكن الوحدة الوظيفية الأساسية تكون دومًا متماثلة، فالحائط الكبير يماثِل الحائط الصغير في نواحٍ عدة. يتضح هذا النوع من تدرُّج الحجم في العديد من النظم الكبيرة التي تنمو مع تزايد عدد المكونات الأساسية المتكررة لها، فينطبق ذلك مثلًا على العديد من المؤسسات الكبيرة وشرائح ذاكرة الكمبيوتر المكوَّنة من أعداد كبيرة من وحدات الترانزستور المتطابقة.

و«النمو الأُسِّي» هو أحد صور تدرُّج الحجم التي تنطبق على أنواع أخرى من النظم الضخمة. يحدث هذا النوع من النمو عندما تحدِّد الروابط — وليس العناصر الأساسية — سلوك النظام، فبالرغم من أن هذه النُّظُم تنمو أيضًا عن طريق إضافة الكثير من الوحدات المتماثلة، فإن سلوكها يعتمد على عدد الروابط بين هذه الوحدات الأساسية، وليس عدد الوحدات فحسب. وهذه الروابط لا تمتد للأجزاء المجاورة منها فحسب — كما الحال مع لبنات الحوائط — وإنما تمتد كذلك للوحدات الأخرى بجميع أنحاء النظام. ومن الأمثلة على ذلك الأجهزةُ العصبية المكوَّنَة من العديد من الروابط التشابكية، والخلايا التي تحتوي على الكثير من البروتينات المتفاعلة، وشبكة الإنترنت المكوَّنَة من عدد كبير من أجهزة الكمبيوتر المتصلة بعضها ببعض. إن هذا الموضوع جدير بالدراسة في حدِّ



شكل ٥-١: جولة في النطاقات الصغيرة ووحدات الطول المُستخدَمة في وصف هذه النطاقات.

ذاته، وتتعامل بالفعل بعض أفرع الفيزياء مع السلوك الناشئ عن هذا النمو والذي يرى بالعين المجردة.

بالرغم من كل ذلك، فإن فيزياء الجسيمات الأولية لا تتعلق بالنظم المعقَّدة المتعددة الوحدات، وإنما تركِّز على تعريف المكونات الأولية والقوانين الفيزيائية التي تخضع لها هذه المكونات، فينصبُّ اهتمام أبحاثها على الكميات الفيزيائية الأساسية وما بينها من تفاعلات. ولا شك أن هذه المكونات الصغيرة ترتبط بالسلوكيات الفيزيائية المعقَّدَة التي تتضمن العديدَ من المكونات التي تتفاعل بصور مثيرة للاهتمام. بَيْدَ أن التعرُّف على أصغر المكونات الأساسية، والنهج الذي تتبعه في سلوكها، هو ما يعنينا هنا.

تتميز أيضًا المكونات الفردية للنظم الكبيرة — سواء في مجال التكنولوجيا أو الأحياء — ببنية داخلية؛ فتتألَّف أجهزة الكمبيوتر من معالجات دقيقة مصنوعة بدورها من وحدات الترانزيستور، وعندما يفحص الأطباء الجسم البشري، يعثرون على أعضاء وأوعية دموية وغير ذلك من المكونات العديدة التي نراها عند تشريح الأجسام، والتي تتكون بدورها من خلايا وحمض نووي ريبي منزوع الأكسجين (دي إن إيه)، وهي العناصر التي يتعذَّر رؤيتها إلا باستخدام تكنولوجيا أكثر تقدُّمًا. وما من تشابه على الإطلاق بين عمل هذه العناصر الداخلية وما نراه عند ملاحظتنا أسطح الأجسام الخارجية؛ فالعناصر عند النطاقات الأصغر حجمًا تتغير، وأفضل وصف للقواعد التي تتبعها هذه العناصر يتغيَّر أيضًا.

وبما أن تاريخ دراسة علم وظائف الأعضاء يتشابه من نواحٍ عدة مع دراسة القوانين الفيزيائية، ويتناول بعض نطاقات الطول المثيرة للاهتمام عند البشر، فعلينا التفكير لحظات في أنفسنا، وفي كيفية إدراك بعض جوانب وظائف الجسم الداخلية المألوفة لدينا قبل أن ننتقل إلى الفيزياء والعالم الخارجي.

تُعَدُّ الترقوة من الأمثلة المثيرة للاهتمام في هذا الشأن، وهي العضو الذي لم يمكن فهم وظيفته إلا من خلال التشريح الداخلي له. ويرجع السبب في الاسم الذي أُطلِق عليها بالإنجليزية — وهو Collarbone — إلى أنه يشبه الياقة collar في مظهره الخارجي، لكن عندما سبر العلماء أغوار الجسم البشري، توصَّلوا إلى جزء يشبه المفتاحَ في عَظْم الترقوة؛ مما جعلهم يطلقون عليها اسمًا آخَر أكثر استخدامًا، وهو clavicle، وهي كلمة مشتقة من كلمة لاتينية تعني «مفتاح».

أيضًا، لم يتمكَّن أحدٌ من فهم الدورة الدموية أو نظام الشعيرات الدموية الذي يربط بين الشرايين والأوردة إلا في أوائل القرن السابع عشر، عندما أجرى ويليام هارفي

تجاربَ دقيقةً لاستكشافِ تفاصيل القلب والشبكات الدموية في الحيوان والإنسان. ورغم أن هارفي كان إنجليزي الأصل، فقد درس الطب في جامعة بادوَا بإيطاليا؛ حيث تعلَّمَ الكثيرَ من معلِّمه هيرونيموس فابريشيوس الذي اهتمَّ بتدفُّق الدم، لكنه أساءَ فهم دور الأوردة وصماماتها.

لم يغيِّر هارفي مفهومنا عن الأجزاء التي تلعب دورًا فعليًّا في الدورة الدموية فحسب — نتحدث هنا عن شبكات الأوردة والشرايين التي تحمل الدم في شبكة متفرعة، وصولًا إلى الشعيرات الدموية التي تعمل في نطاقات أصغر — وإنما اكتشف أيضًا العمليةَ التي يجري بها ذلك؛ فالدم يُنقَل من الخلايا وإليها بصور لم يسبق لأحد توقُّعها إلى أن أُجرِيت الأبحاث في هذا الشأن. ولم يكتشف هارفي كتالوجًا فحسب، وإنما نظامًا جديدًا بالكامل.

رغم ذلك، لم يمتلك هارفي الأدوات التي تمكِّنه من اكتشاف نظام الشعيرات الدموية من الناحية الفيزيائية، وهو الأمر الذي لم ينجح مارشيللو مالبيجي في تحقيقه إلا في عام ١٦٦١. وقد تضمَّنَت اقتراحات هارفي فرضياتٍ قائمةً على مجادلات نظرية لم تؤكِّد التجاربُ صحتَها إلا فيما بعدُ. ومع أن هارفي قدَّمَ رسومًا مفصَّلة في هذا الشأن، فإنه لم يتمكَّن من الوصول للمستوى ذاته من الدقة الذي وصل إليه مستخدمو المجهر، مثل ليونهوك، في وقت لاحق.

يتكوَّن النظام الدوري في جسم الإنسان من خلايا دم حمراء، وهذه العناصر الداخلية لا يتجاوز طولها سبعة ميكرومترات؛ أي ما يساوي نحو واحد على مائة ألف من حجم العصا المترية، ويقل هذا الحجم ١٠٠ مرة عن سُمْك البطاقة الائتمانية؛ أي ما يساوي تقريبًا حجم قطيرة الضباب، وأصغر ١٠ مرات مما نراه بالعين المجردة (وهو ما يقلُّ بدوره بعض الشيء عن خصلة شعر الإنسان).

لا شك أن تدفُّق الدم ودورانه ليس العملية الوحيدة في الجسم البشري التي أزاح الأطباء الستار عن أسرارها بمرور الوقت، ولم يتوقف كذلك استكشاف البنية الداخلية للجسم البشري عند نطاق الميكرومتر؛ فقد تكرَّرَ اكتشاف العناصر والنُّظُم الجديدة كليةً منذ ذلك الحين في نطاقات متتابعة الصِّغَر، سواء في الإنسان أو النظم الفيزيائية غير الحية على حدٍّ سواء.

وعند حجم عُشْر الميكرون تقريبًا — أصغر من المتر بعشرة ملايين مرة — نجد الحمض النووي (الدي إن إيه) الذي يمثِّل اللَّبِنة الأساسية في تركيب جميع الكائنات

الحية، ويلعب الدور المحوري في تشفير المعلومات الوراثية لهذه الكائنات. وهذا الحجم أكبر من الذرة بنحو ١٠٠٠ مرة، لكنه مع ذلك يمثِّل نطاقًا تلعب فيه الفيزياء الجزيئية (أي الكيمياء) دورًا مهمًّا. ورغم أننا لم نستوعب بعدُ العملياتِ الجزيئيةَ التي تجري داخل الدي إن إيه استيعابًا كاملًا، فإن هذه العمليات هي الأساس لصور الحياة المتعددة بجميع أنحاء كوكب الأرض. وتشتمل جزيئات الدي إن إيه على ملايين النيوكليوتيدات؛ لذا لا عجب في أهمية الدور الذي تلعبه الروابط الذرية الميكانيكية الكمية.

الدي إن إيه في حدِّ ذاته يمكن تصنيفه على مستويات مختلفة من النطاقات؛ فمع بنيته الجزيئية الملتفة، يمكن أن يُقاس طولُ الدي إن إيه البشري بوحدة المتر، لكنَّ الجدائلَ التي يتكوَّن منها لا يتجاوز عَرْضُها اثنين من الألف من الميكرون؛ أي ما يساوي نانومترين، وهذا أصغر من أصغر بوابة ترانزستور في أي معالج دقيق، والتي يبلغ حجمها ٣٠ نانومترًا. والنيوكليوتيد الواحد لا يتجاوز طوله ٠٫٣٣ نانومتر، وحجمه يقارب حجم جزيء الماء. وطول الجين الواحد يساوي ما يتراوح بين ١٠٠٠ إلى ١٠٠٠٠٠ نيوكليوتيد؛ ومن ثَمَّ فإن أكثر الأوصاف دقةً للجين هي تلك التي تنطوي على أسئلة مختلفة عمَّا قد نطرحه بشأن النيوكليوتيدات الفردية؛ ومن ثَمَّ فإن الدي إن إيه يعمل بصور مختلفة في نطاقات الطول المتباينة. وعند تناول الدي إن إيه، يطرح العلماء أسئلةً مختلفةً ويستخدمون أوصافًا مختلفة في نطاقات متباينة.

تتشابه الأحياء مع الفيزياء من حيث إن الوحدات الصغيرة تنشأ عنها البنيةُ التي نراها في النطاقات الكبيرة، لكن علم الأحياء يشمل ما هو أكثر من مجرد فهم العناصر الفردية للنُّظُم الحية؛ فأهداف علم الأحياء أكثر طموحًا بكثير. ورغم إيماننا بأن العمليات التي تجري في الجسم البشري تستند إلى قوانين الفيزياء، فإن الأنظمة البيولوجية الوظيفية معقَّدةٌ وإشكاليةٌ، وتؤدِّي عادةً إلى نتائج يصعب التنبؤ بها. وتفكيكُ الوحداتِ الأساسية وآلياتِ التغذية الراجعة المعقَّدَة مهمَّةٌ صعبةٌ للغاية، ويزيد من تعقيدها الرياضيات التوافقية للشفرة الوراثية. وحتى مع معرفة الوحدات الأساسية، سنظل أمام مهمة جسيمة، وهي تحليل العلوم الناشئة الأكثر تعقيدًا، لا سيما المسئولة منها عن الحياة.

الفيزيائيون أيضًا لا يمكنهم دومًا فهم العمليات التي تحدث في النطاقات الكبيرة من خلال استيعاب بنية الوحدات الفرعية الفردية، لكن أغلب النُّظُم الفيزيائية أبسط في هذا الشأن من النُّظُم البيولوجية؛ فمع أن البنية المركبة تتسم بالتعقيد، وقد تشتمل

على خصائص مختلفة تمامًا عن الوحدات الأصغر، يقل حجم الدور الذي تلعبه آليات التغذية الراجعة والبنية المتطورة عادةً في الفيزياء. ويُعَدُّ العثورُ على أبسط المكونات الأولية هدفًا مهمًّا لدى الفيزيائيين.

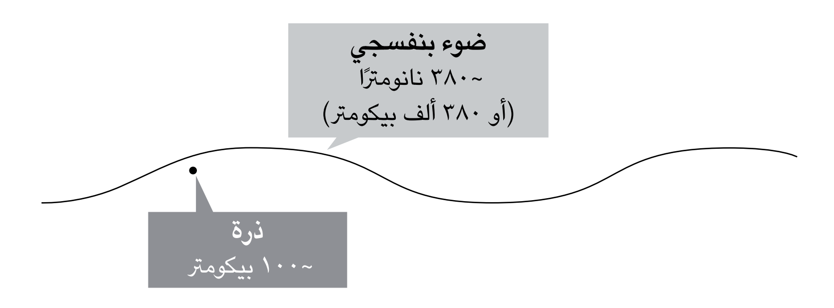
النطاقات الذرية

حين نبتعد عن آليات النظم الحية ونتوغَّل في نطاقات أصغر لفهم العناصر الفيزيائية الأساسية نفسها، سيكون المستوى التالي الذي سنتوقف عنده قليلًا هو النطاق الذري، وهو ما يساوي ١٠٠ بيكومتر، أو ما يقل عن المتر بحوالي ١٠٠٠٠ مليون (١٠^١٠) مرة. يصعب تحديد نطاق الذرة بدقة؛ لأنه يتضمن إلكترونات تدور حول نواة، ولا تتسم بالثبات مطلقًا، لكن جرَتِ العادة على تصنيف متوسط المسافة بين الإلكترون والنواة، وتعريف ذلك بأنه حجم الذرة.

يكوِّن الناس صورًا في مخيلتهم لشرح العمليات الفيزيائية التي تحدث في هذه النطاقات الصغيرة، لكن هذه الصور تعتمد بالضرورة على القياس، فما من خيار أمامنا سوى تطبيق الأوصاف التي نعرفها من واقع خبراتنا بنطاقات الأطوال المعتادة، لوصف بنية مختلفة كليةً وتعكس سلوكًا غريبًا ومناقضًا للبديهة.

لكن رسم صورة صادقة للجزء الداخلي من الذرة أمر مستحيل في ظل ما نتمتَّع به من خصائص فسيولوجية؛ أي الحواس والبراعة اليدوية الملائمة لحجمنا البشري. تعتمد رؤيتنا، على سبيل المثال، على الظواهر التي تُرَى بفضل الضوء المكوَّن من موجات كهرومغناطيسية، وهذه الموجات الضوئية — الموجودة في الطيف البصري — يتراوح طولها ما بين ٣٨٠ و٧٥٠ نانومترًا؛ وهي بذلك أكبر بكثير من حجم الذرة الذي لا يتجاوز عُشْر النانومتر (انظر الشكل ٥-٢).

يعني ذلك أن الفحصَ الدقيق للذرة باستخدام الضوء المرئي في محاولة لرؤية ما بداخلها بأعيننا المجردة أمرٌ مستحيل، شأنه شأن إدخال خيط في إبرة بينما ترتدي قفَّازًا يكسو الأصابع الأربع معًا والإبهام منفردًا. فالأطوال الموجية للضوء المرئي تُرغِمنا دون أن ندري على تجاوُز الأحجام الصغيرة التي لا يمكن لهذه الموجات الممتدة الوصول إليها أبدًا؛ ومن ثَمَّ فإن الرغبة في «رؤية» الكواركات أو البروتونات — بالمعنى الحرفي لكلمة «رؤية» — أمر محال. نحن ببساطة لا نملك القدرة على رؤية ما يوجد داخل الذرة بدقة.



شكل ٥-٢: الذرة الواحدة ليست سوى شذرة بسيطة إذا ما قُورِنت بأصغر موجات الضوء المرئي.

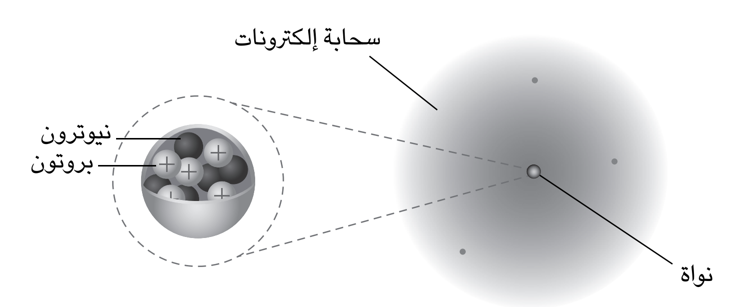
لكن الخلطَ بين قدرتِنا على تصوُّر الظواهر وثقتِنا في صحتها خطأٌ لا يمكن للعلماء الوقوع فيه؛ فعدم الرؤية، أو حتى تكوين صورة ذهنية، لا يعني أنه لا يمكننا الاستدلال على العناصر الفيزيائية أو العمليات التي تجري في هذه النطاقات.

ومن موقع مراقبتنا الافتراضية بنطاق الذرة، قد يبدو العالَم غير قابل للتصديق؛ لأن قواعد الفيزياء مختلفة تمامًا عن القواعد التي تنطبق على النطاقات التي نحدِّدها بمعايير القياس في الأطوال التي نَأْلَفُها. ويبدو عالَم الذرة مغايرًا تمامًا لفكرتنا عنه، هذه الفكرة التي نكوِّنها على أساس رؤيتنا للمادة (انظر الشكل ٥-٣).

ولعل أولَ الأمور التي يمكن ملاحظتها هنا، وأكثرَها إثارةً للدهشة، هو أن السواد الأعظم من الذرة يتألَّف من فراغ خاوٍ.[2] فنصف قطر النواة الموجودة في مركز الذرة أصغر بعشرة آلاف مرة من نصف قطر مدارات الإلكترونات. ويبلغ حجم النواة في المتوسط حوالي ١٠^−١٤^ أمتار؛ أي ١٠ فمتومترات، ونواة الهيدروجين أصغر ١٠ مرات من ذلك. فالنسبة بين حجم النواة ونصف قطر الذرة أشبه بالنسبة بين نصف قطر الشمس وحجم النظام الشمسي ككل؛ ولهذا أغلب مساحة الذرة فارغة؛ لأن حجم النواة يبلغ واحدًا على التريليون من حجم الذرة.

ليس هذا ما نلاحظه أو نلمسه عندما نمسك بباب ما أو نشرب سائلًا باردًا باستخدام ماصة؛ فحواسنا تجعلنا نظن أن المادة شيء ثابت، لكن على مستوى النطاقات الذرية

أجزاء الذرة



شكل ٥-٣: تتألَّف الذرة من إلكترونات تدور حول نواة مركزية تتكون بدورها من بروتونات موجبة الشحنة، وتساوي شحنتها ١، ونيوترونات متعادلة الشحنة؛ أي إن شحنتها تساوي صفرًا.

نجد أن المادة تخلو في أغلبها من أي شيء جوهري. إننا نتعامَلُ بحواسنا مع أحجام كبيرة تجعل المادة تبدو لنا صلبةً وثابتة، لكنها ليست كذلك على مستوى النطاقات الذرية.

ليس الفراغ شبه التام الأمر الوحيد المثير للدهشة في المادة على مستوى النطاق الذري، وإنما ما أحدث ثورةً في عالم الفيزياء — ولا يزال لغزًا مستعصيًا على الفيزيائيين وغير الفيزيائيين على حدٍّ سواء — هو أن أبسط الأسس المنطقية لمبادئ نيوتن الفيزيائية لا تنطبق على نطاق هذه المسافة الدقيقة. إن كلًّا من الطبيعة الموجية للمادة ومبدأ عدم اليقين (وهما عنصران أساسيان في ميكانيكا الكم) يلعبان دورًا مهمًّا في فهم الإلكترونات الذرية، وهما لا يتبعان المنحنيات البسيطة التي تعيِّن المسارات المحددة التي نراها دومًا. فتنص ميكانيكا الكم على أنه لا يمكن لأحدٍ قياسُ موضع الجسيمات وزخمها بدقة متناهية، الأمر الذي يمثِّل شرطًا أساسيًّا من أجل تتبع مسار أي جسم على مدار الوقت. ومبدأ عدم اليقين، الذي توصَّلَ إليه فيرنر هايزنبرج في عام ١٩٢٦، ينصُّ على أن الدقة التي يُحدَّد بها موضعٌ ما تحِدُّ من الدقة القصوى التي يمكن للمرء قياس الزخم بها.[3] وإن كانت الإلكترونات تتَّبِع المسارات المعتادة، لعلمنا بالضبط — في أي وقت — موضعَ الإلكترون وسرعتَه واتجاهَ تحرُّكه لنتمكَّنَ بذلك من معرفة المكان الذي سيكون فيه بعد ذلك، لكن هذا يناقض مبدأ هايزنبرج.

تقضي ميكانيكا الكم بأن الإلكترونات لا تشغل مواضعَ ثابتة داخل الذرات، مثلما قد يبدو من تصوُّرنا التقليدي لها. وتوضِّح لنا توزيعات الاحتمالات أن الإلكترونات توجد في الغالب في أي نقطة بعينها في الفضاء، وهذه الافتراضات هي كل ما نعرفه؛ ومن ثَمَّ يمكننا التنبؤ بمتوسط موضع الإلكترون كدالة زمنية، لكن أي قياس محدَّد للموضع سيكون عُرْضة لمبدأ عدم اليقين.

جدير بالذكر هنا أن هذه التوزيعات ليست اعتباطية؛ فلا يمكن للإلكترونات أن تملك أي توزيع احتمالات قديم أو طاقة قديمة. وما من أسلوب تقليدي جيد لوصف مدار الإلكترون، ولا يمكن وصفه إلا من وجهة نظر احتمالية. لكن توزيعات الاحتمالات هي في الواقع دالات محددة؛ فباستخدام ميكانيكا الكم، يمكن كتابة معادلة تصف الحل الموجي لأحد الإلكترونات، وهي المعادلة التي ستوضِّح لنا احتمالية وجود هذا الإلكترون في أي موضع في الفضاء.

من سمات الذرة الأخرى المميزة من وجهة نظر فيزياء نيوتن التقليدية أن الإلكترونات داخل الذرة لا يمكن أن تشغل سوى مستويات طاقة محدَّدة الكمية. وتعتمد مدارات الإلكترونات على طاقاتها، وهذه المستويات المحددة من الطاقة وما يرتبط بها من احتمالات لا بد أن تتسق مع قواعد ميكانيكا الكم.

والمستويات المحددة الكمية للإلكترونات ضروريةٌ لفهم الذرة. ففي مطلع القرن العشرين، تمثَّلَتْ إحدى النقاط المهمة التي أوضحت أن القواعد التقليدية عليها أن تتغيَّر جذريًّا في أن الإلكترونات التي تدور حول النواة ليست ثابتة. فتلك القواعد تقضي بأن الإلكترونات تبث طاقةً؛ ومن ثَمَّ لا بد أن تسقط سريعًا نحو المنتصف. ولم يكن ذلك بعيدًا كلَّ البُعْد فقط عن طبيعة الذرة، وإنما ما كان ليسمح أيضًا بتشكل بنية المادة التي تنشأ من ذرات مستقرة كما نعلم.

واجه نيلز بور في عام ١٩١٢ اختيارًا صعبًا؛ أَلَا وهو التخلي عن الفيزياء التقليدية أو التخلي عن إيمانه بالواقع المرصود. وكان بور حكيمًا في اختياره؛ إذ اختار التخلِّي عن الفيزياء التقليدية، وافترض أن قوانينها لا تنطبق على المسافات الصغيرة التي تحتلها الإلكترونات داخل الذرة. وكانت هذه إحدى الأفكار المتبصرة الأساسية التي أدَّتْ إلى تطوير فيزياء الكم.

ما إن تخلَّى بور عن قوانين نيوتن — على الأقل في هذا النظام المحدود — حتى تمكَّنَ من التسليم بأن الإلكترونات تشغل مستويات طاقة ثابتة، وذلك وفقًا لحالة كمية

افترضها. وتتضمن هذه الحالة كمية تُسمَّى «الزخم الزاوي الدائري». ووفقًا لبور، فإن هذه القاعدة الكمية التي وضعها تنطبق على النطاق الذري، وقد اختلفت هذه القواعد عن تلك التي نستخدمها في النطاقات العيانية، مثلما الحال في دوران الأرض حول الشمس.

من الناحية الفنية، تنطبق ميكانيكا الكم على هذه الأنظمة العيانية أيضًا، لكن آثارها أقل بكثير من أن تُقاس أو تُلاحَظ. فعندما تلاحظ مدار الأرض أو أي جسم عياني آخَر، يمكن تجاهُل ميكانيكا الكم، فتتساوى الآثار في هذه القياسات بحيث يتفق أي تنبؤ مع نظيره التقليدي. وكما أوضحنا في الفصل الأول من هذا الكتاب، تظل التنبؤات التقليدية المتعلقة بقياسات النطاقات العيانية، بوجه عام، تقديرات جيدة للغاية، جيدة لدرجة أنه لا يمكنك تمييز أن ميكانيكا الكم هي في الواقع البنية الأساسية الأعمق لها. ومن أمثلة التنبؤات التقليدية الكلمات والصور الظاهرة على شاشة كمبيوتر فائقة الدقة؛ فالأساس الذي تقوم عليه هو البكسلات العديدة التي تشبه البنية التحتية الذرية الميكانيكية الكمية. لكن الصور أو الكلمات هي كل ما نحتاج إلى رؤيته (أو نريد رؤيته) بوجه عام.

تشكِّل ميكانيكا الكم تغيرًا في النموذج الفكري لا يتضح إلا في النطاق الذري. وبالرغم من افتراض بور المتطرف، فإنه لم يتخلَّ عمَّا كان معلومًا من قبلُ؛ فلم يفترض أن فيزياء نيوتن التقليدية خاطئة، وإنما افترض فقط أن القوانين التقليدية لا تسري على الإلكترونات داخل الذرة. والمادة العيانية، التي تتألَّف من عدد كبير من الذرات بحيث يتعذَّر تمييزُ الآثار الكمية بها، تنطبق عليها قوانين نيوتن، على الأقل على المستوى الذي يمكن لأي شخص قياس نجاح التنبؤات عنده. ليست قوانين نيوتن خاطئة، ونحن لا نغضُّ الطرف عنها في النطاق الذي تنطبق عليه، لكن في النطاق الذري، لم يكن هناك مفرٌّ من فشل قوانين نيوتن. وقد فشلت هذه القوانين على نحو واضح ومثير، الأمر الذي أدَّى إلى تطوير قواعد جديدة لميكانيكا الكم.

الفيزياء النووية

بينما نواصل التقدم في رحلتنا المتوغلة داخل النطاقات الأصغر وانتقالنا من الذرة إلى النواة، نواصل مشاهدة أوصاف مختلفة، ومكونات أساسية متباينة، بل قوانين فيزيائية مختلفة أيضًا. لكن النموذج الفكري الأساسي لميكانيكا الكم يظل كما هو بلا تغير.

سنستكشف الآن داخل الذرة بنية داخلية يبلغ حجمها حوالي ١٠ فمتومترات، وهو الحجم النووي المساوي لواحد على المائة من النانومتر. وبقدر ما تمكَّنَّا من قياسه حتى الآن، تمثِّل الإلكترونات مكونات أساسية للمادة؛ إذ لا يبدو أنها تتكون من مكونات أصغر. على الجانب الآخَر، لا تُعَدُّ النواة مكوِّنًا أساسيًّا؛ فهي تتكون من عناصر أصغر تُعرَف بالنويَّات، والنويَّات بدورها إما بروتونات أو نيوترونات؛ تحمل البروتونات شحنة كهربية موجبة، أما النيوترونات فمتعادلة الشحنة؛ أي إنها ليست موجبة أو سالبة.

ومن سبل فهم طبيعة البروتونات والنيوترونات إدراك أنها ليست مكوِّنات أساسية للمادة هي الأخرى. ملأ الحماس جورج جاموف، عالم الفيزياء النووية ومبسط العلوم العظيم، بشأن اكتشاف البروتونات والنيوترونات، حتى إنه ظن أنها تمثِّل «أقصى الحدود الداخلية»؛ بمعنى أنه اعتقد أنه لا توجد بنية ثانوية أدق من ذلك، ووردت على لسانه الكلمات التالية:

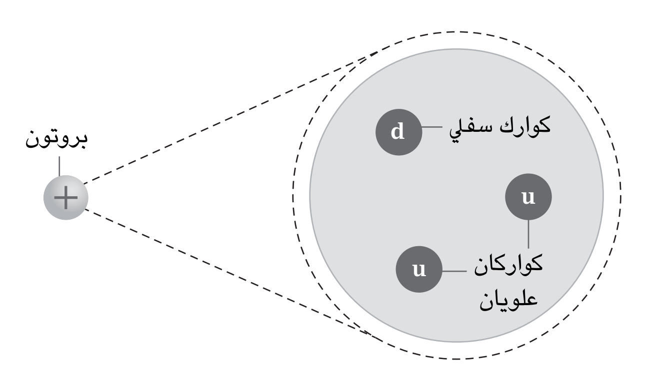
«بدلًا من العدد الكبير من الذرات «غير القابلة للتجزئة» التي تشير إليها الفيزياء التقليدية، صار أمامنا ثلاث وحدات مختلفة اختلافًا جوهريًّا: البروتونات والإلكترونات والنيوترونات … من ثَمَّ يبدو أننا قد وصلنا إلى أقصى حدود بحثنا فيما يتعلق بالعناصر الأساسية المكونة للمادة.»[4]

انطوى ذلك على شيء من ضيق الأفق، أو بالأحرى لم يكن بالقدر الكافي من ضيق الأفق؛ فثمة بنية تحتية أدق بالفعل — مكونات أصغر من البروتونات والنيوترونات — لكن العثور على هذه العناصر الجوهرية كان عسيرًا؛ فاستلزم ذلك أن يكون المرء قادرًا على دراسة نطاقات الطول الأصغر من البروتون والنيوترون، الأمر الذي تطلَّبَ مستويات أعلى من الطاقة، أو أدوات فحص أصغر من تلك التي كانت متوفرة في الوقت الذي توصَّلَ فيه جاموف إلى تنبُّئِه غير الدقيق.

إذا نظرنا الآن داخل النواة لمشاهدة النويَّات والبروتونات التي يبلغ حجمها حوالي وحدة فيرمي واحدة — وهي الوحدة الأصغر عشر مرات من النواة نفسها — فسنجد أجسامًا شكَّ كلٌّ من جورج زفايج وموري جيلمان في وجودها داخل النواة. أطلق جيلمان اسمًا مبتكرًا على هذه الوحدات الثانوية؛ ألا وهو الكواركات، مستوحيًا إياه من عبارة «ثلاثة كواركات للسيد مارك» التي وردت في كتاب جيمس جويس «صحوة فينيجان». والكواركات العلوية والسفلية داخل النويَّة هي الجسيمات الأساسية الأصغر حجمًا (يعرض الشكل ٥-٤ الكواركين العلويين والكوارك السفلي داخل البروتون)، وتربط

بينها قوة تُسمَّى «القوة النووية القوية» لتتكون بذلك البروتونات والنيوترونات. ورغم هذا الاسم غير المميز، تُعَدُّ القوة النووية القوية نوعًا خاصًّا من قوى الطبيعة، وهي القوة التي تكمل القوى الأخرى المعروفة لدينا، وهي: الكهرومغناطيسية والجاذبية والقوة النووية الضعيفة، التي سنتناولها لاحقًا.

تُسمَّى القوة النووية القوية بهذا الاسم لأنها قوية؛ وهذا اقتباس لعبارة قالها أحد الفيزيائيين الزملاء بالفعل. ورغم ما يبدو عليه ذلك من سخف، فهو يعبِّر عن الحقيقة بالفعل؛ ولهذا توجد الكواركات دومًا مرتبطة بعضها ببعض في صورة جسيمات، مثل البروتونات والنيوترونات، وهي الجسيمات التي يتلاشى داخلها الأثرُ المباشِرُ للقوة النووية القوية. وتبلغ هذه القوة من الشدة درجةً يستحيل معها العثور على المكونات الفردية المتفاعلة بواسطتها على نحو منفصل.



شكل ٥-٤: تحمل شحنة البروتون ثلاثة كواركات متكافئة (اثنين علويَّين وآخَرَ سفليًّا).

يستحيل فصل كوارك واحد أبدًا؛ فيبدو الأمر كما لو كانت الكواركات تحمل نوعًا من الغراء يزيد في شدته مع زيادة المسافة (ولهذا، تُعرَف الجسيمات التي توصل القوة القوية باسم «الجلوونات» وهي مشتقة من كلمة glue الإنجليزية التي تعني صمغ)، ويمكن تشبيه ذلك بالشريط المرن الذي لا تظهر قوة ارتداده إلا عند مدِّه. فداخل البروتون أو النيوترون، تتحرك الكواركات بحُرِّية، لكن محاولة إبعاد أحد الكواركات لمسافة كبيرة يتطلَّب قوة إضافية.

رغم أن هذا الوصف صحيح ومنصف تمامًا، ينبغي توخِّي الحذر عند تفسيره، فلا مفر من أن يظن المرء أن الكواركات مرتبطة جميعًا بعضها ببعض داخل غشاء فاصل ملموس لا يمكنها الفرار منه. في الواقع، يتعامل أحد نماذج النظم النووية مع البروتونات والنيوترونات من هذا المنطلق، لكن هذا النموذج — على عكس النماذج الأخرى التي سنتناولها لاحقًا — ليس افتراضًا لما يحدث بالفعل، فهو لم يهدف إلا لإجراء حسابات في نطاق مسافات وطاقات تتسم فيها القوى بشدة لا تنطبق عليها الأساليب المألوفة لدينا.

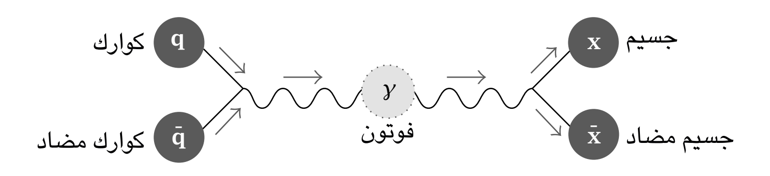
والبروتونات والنيوترونات ليست كالنقانق؛ فما من غلاف صناعي يحيط بالكواركات داخل البروتون، فالبروتونات مجموعات ثابتة من ثلاثة كواركات ترتبط معًا بفعل القوة القوية. ونظرًا للتفاعلات القوية، تعمل هذه الكواركات الثلاثة الخفيفة على نحو متناغم كجسيم واحد، سواء أكان نيوترونًا أم بروتونًا.

من النتائج الأخرى المهمة للقوة القوية — وميكانيكا الكم — التكوين السريع لجسيمات «افتراضية» داخل البروتون أو النيوترون، وهي الجسيمات التي تسمح بها ميكانيكا الكم ولا تستمر للأبد، لكنها تساهم بقدر من الطاقة خلال أي فترة زمنية معينة. فالكتلة (ومن ثمَّ، الطاقة وفق ما تنص عليه معادلة أينشتاين: الطاقة تساوي الكتلة مضروبة في مربع سرعة الضوء) داخل البروتون أو النيوترون لا تحملها الكواركات نفسها فقط، وإنما أيضًا الروابط التي تربط بينها. والقوة القوية تشبه الشريط المرن الذي يربط كرتين معًا ويحمل في حد ذاته الطاقة، و«انتزاع» الطاقة المخزنة يسمح بتكون جسيمات جديدة.

وما دام صافي شحنة الجسيمات الجديدة يساوي صفرًا، فإن تكوُّنَ هذه الجسيمات من الطاقة الموجودة في البروتون لا ينتهك أي قوانين فيزيائية متعارَف عليها. على سبيل المثال، لا يمكن للبروتون ذي الشحنة الموجبة أن يتغيَّر فجأةً إلى جسيم متعادل الشحنة عند تكوُّن الجسيمات الافتراضية.

يعني ذلك أنه في كل مرة يتكوَّن فيها كوارك — وهو جسيم يحمل شحنةً غير صفرية — لا بد أن يتكوَّن كوارك مضاد؛ وهو جسيم مساوٍ للكوارك في الكتلة، لكنه مضاد له في الشحنة. وفي الواقع، يمكن لأزواج الكواركات والكواركات المضادة أن تتكوَّن وتفنى، على سبيل المثال، يمكن لكوارك وكوارك مضاد أن ينتجا فوتونًا (وهو الجسيم الذي يوصل الطاقة الكهرومغناطيسية)، وينتِج هذا الفوتون بدوره زوجًا آخَر من الجسيمات/الجسيمات المضادة (انظر الشكل ٥-٥). وتبلغ الشحنة الكلية لهذه

الجسيمات صفرًا؛ ومن ثَمَّ حتى مع تكوُّن الزوج وهلاكه، لن تتغيَّر الشحنة داخل البروتون.



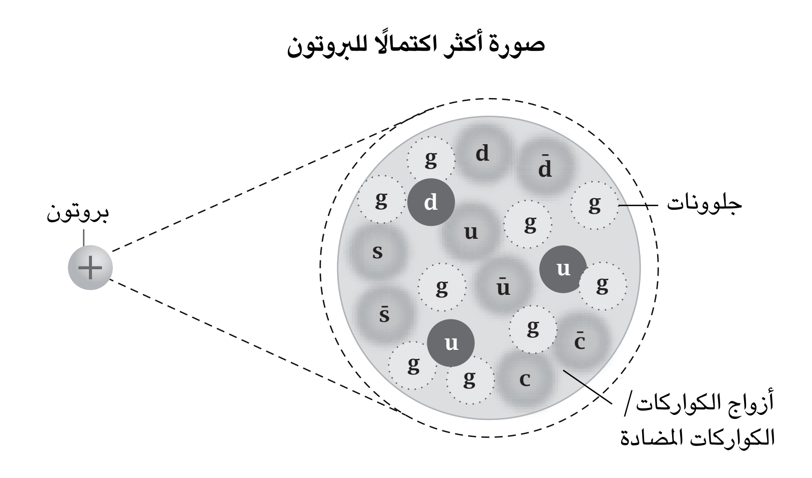
شكل ٥-٥: يمكن للكواركات والكواركات المضادة العالية الطاقة أن تفنى متحوِّلة إلى طاقة، وهذه الطاقة تنتج بدورها جسيمات وجسيمات مضادة أخرى ذات شحنة.

فضلًا عن الكواركات والكواركات المضادة، يشتمل «بحر البروتونات» (وهذا هو المصطلح العلمي) — الذي يحتوي على جسيمات افتراضية — على جلوونات أيضًا. والجلوونات جسيمات تعمل على توصيل القوة القوية، وهي مماثلة للفوتونات التي تتبادلها الجسيمات ذات الشحنات الكهربائية لإحداث تفاعلات كهرومغناطيسية. تعمل الجلوونات (ثمَّة ثمانية أنواع مختلفة منها) على نحو مشابه لتوصيل القوة النووية القوية، فتتبادلها الجسيمات التي تحمل الشحنة التي تؤثِّر عليها القوة القوية، ويؤدي تبادلها إلى تجاذب الكواركات أو تنافرها.

لكن بخلاف الفوتونات، التي لا تحمل شحنة كهربائية ومن ثَمَّ لا تتعرض مباشرةً لتأثير القوة الكهرومغناطيسية، تتعرض الجلوونات نفسها لتأثير القوة القوية. لذا، بينما تنقل الفوتونات القوة على مدى مسافات هائلة — الأمر الذي يمكِّننا من تشغيل التلفاز وتلقِّي إشارات صدرت من على بعد أميال عديدة — لا يمكن للجلوونات، مثل الكواركات، أن تنتقل بعيدًا دون تفاعل، فهي تربط الأجسام على مدى نطاقات صغيرة مقاربة لحجم البروتون.

وإذا نظرنا للبروتون عن كثب، وركَّزنا فقط على العناصر التي تحمل شحنته، فسنجد أن البروتون يتكوَّن بشكل أساسي من ثلاثة كواركات. لكن البروتون، في الحقيقة، يحتوي على ما هو أكثر بكثير من كواركات التكافؤ الثلاثة التي تحمل شحنته (الاثنان العلويَّان والآخَر السفلي)، فبالإضافة إلى الكواركات الثلاثة المسئولة عن

شحنة البروتون، يشتمل البروتون على بحر من الجسيمات الافتراضية، وهي الجلوونات وأزواج الكواركات/الكواركات المضادة، وكلما دقَّقنا أكثر في فحص البروتون عن كثب، اكتشفنا جلوونات وأزواج كواركات/كواركات مضادة أكثر. ويعتمد التوزيع الدقيق لهذه الجسيمات على الطاقة التي نستخدمها في سبر أغوار البروتون؛ ففي ظل الطاقات التي تتصادم في ظلها البروتونات حاليًّا، نجد أن قدرًا كبيرًا من طاقتها تحملها الأنواع المختلفة من الكواركات والكواركات المضادة والجلوونات الافتراضية، وليس لهذه الجسيمات الافتراضية أهمية في تحديد الشحنة الكهربائية؛ إذ إن مجموع شحنات هذه الجسيمات الافتراضية جميعها يساوي صفرًا، لكنها — كما سنرى لاحقًا — مهمة في التنبؤ الخاص بتصادمات البروتونات، هذه التصادمات التي نحتاج إليها لمعرفة ما بداخل البروتون وما يحمل طاقته بالضبط. (انظر الشكل ٥-٦ للاطلاع على بنية البروتون الداخلية الأكثر تعقيدًا.)



شكل ٥-٦: يُجرِي مصادم الهادرونات الكبير تصادمات للبروتونات عند مستويات عالية من الطاقة. ويحتوي كل بروتون على ثلاثة من كواركات التكافؤ، بالإضافة إلى العديد من الجلوونات والكواركات الافتراضية التي يمكن أن تشارك أيضًا في التصادمات.

الآن، وبعد أن تعمَّقْنا حتى وصلنا إلى مستوى الكواركات التي تربطها معًا القوةُ النووية القوية، كنتُ أود أن يكون بوسعي إخباركم بما يحدث عند نطاقات أصغر من ذلك. هل ثمة بنية داخل الكوارك أو داخل الإلكترون؟ حتى الآن، ما من دليل لدينا على ذلك، وما من تجربة حتى الآن قدَّمَتْ أي دليل على أي بنية تحتية أصغر من ذلك؛ لذا فإن الكواركات والإلكترونات تمثِّل نهاية رحلتنا داخل المادة، حتى الآن.

لكن مصادم الهادرونات الكبير يستكشف الآن نطاقًا من الطاقة يزيد عن النطاقات المرتبطة بكتلة البروتون بأكثر من ١٠٠٠ مرة؛ ومن ثم، فإن المسافة التي يدرسها أصغر بأكثر من ١٠٠٠ مرة من هذه النطاقات أيضًا. يحقِّق مصادم الهادرونات الكبير أهم إنجازاته بتحقيق التصادم بين حزمتي بروتونات عُجِّلَتَا إلى مستوًى مرتفع للغاية من الطاقة يفوق أي مستوًى تمَّ التوصل إليه من قبلُ على سطح الأرض، وتحتوي حزم البروتونات في مصادم الهادرونات الكبير على بضعة آلاف من مجموعات الجسيمات، تشمل ١٠٠ مليار من البروتونات المتصافة أو المتوازية التي تتركز في حزم صغيرة تدور في النفق الموجود تحت الأرض. ويوجد كذلك في المصادم ١٢٣٢ مغناطيسًا فائق التوصيل حول الحلقة للحفاظ على البروتونات داخل أنبوب الحزم، بينما تعجِّل المجالات الكهربائية هذه الحزم لتصل بها إلى مستويات عالية من الطاقة. وهناك مغناطيسات أخرى (٣٩٢ مغناطيسًا على وجه التحديد) تُعِيد توجيه الحزمتين بحيث تتوقَّفَان عن التدفق كلٌّ منهما بجوار الأخرى وتتصادمان بدلًا من ذلك.

بعد ذلك — وهنا تكمن الإثارة — توجِّه المغناطيسات حزمتَيِ البروتونات حول الحلقة في مسار دقيق ليتصادَمَا في منطقة أصغر من عرض شعرة الإنسان، وعند حدوث هذا التصادم، تتحول بعض طاقة البروتونات المعجلة إلى كتلة، مثلما تنص معادلة أينشتاين الشهيرة: ط = كس^{٢}، ومع هذه التصادمات وما تصدره من طاقة، يمكن أن تتكون جسيمات أولية جديدة أثقل وزنًا من أي جسيمات شهدناها من قبلُ.

عند التقاء البروتونات، تتصادم الكواركات والجلوونات أحيانًا بقدر هائل من الطاقة في منطقة شديدة التركيز، الأمر الذي يشبه كثيرًا تصادُمَ الحصى الموجود داخل بالون معًا. ويوفر مصادم الهادرونات الكبير هذا القدر الهائل من الطاقة، الأمر الذي يساعد في ارتطام المكونات الفردية للبروتونات المتصادمة معًا. تشمل هذه الجسيمات الكواركين العلويين والكوارك السفلي، وهي الكواركات المسئولة عن شحنة البروتون، لكن في ظل الطاقات الموجودة في مصادم الهادرونات الكبير، تحمل الجسيمات الافتراضية أيضًا قدرًا

كبيرًا من طاقة البروتون. وبالإضافة إلى الكواركات الثلاثة التي تساهم في شحنة البروتون في مصادم الهادرونات الكبير، يتصادم «بحر» البروتونات الافتراضي أيضًا.

عندما يحدث ذلك — وهنا يكمن سر فيزياء الجسيمات برمتها — يمكن أن تتغيَّر أعداد الجسيمات وأنواعها. والنتائج الجديدة لمصادم الهادرونات الكبير من المفترض أن تمنحنا مزيدًا من المعرفة بشأن المسافات والأحجام الصغيرة، وإلى جانب منحنا معلومات حول البنية التحتية المحتملة، من المفترض أن يوضِّح لنا المصادم كذلك جوانب أخرى من العمليات الفيزيائية التي قد تكون ذات صلة بالمسافات الصغيرة. وطاقات مصادم الهادرونات الكبير هي الحد التجريبي النهائي القصير المدى، على الأقل لفترة من الوقت.

تجاوز حدود التكنولوجيا

أنهينا بذلك رحلتنا التمهيدية في النطاقات الصغيرة التي يمكن الوصول إليها بواسطة التكنولوجيا الحالية، أو حتى المُتخيَّلة، لكن القيود الحالية للقدرة البشرية على الاستكشاف لا تقيد من طبيعة الواقع. وحتى إن بدا أننا سنواجه صعوبةً في تطوير تكنولوجيا تمكِّننا من استكشاف نطاقات أصغر كثيرًا، فسيظل بإمكاننا محاولة الاستدلال على البنية والتفاعلات في هذه النطاقات باستخدام النقاشات الرياضية والنظرية.

لقد قطعنا شوطًا كبيرًا منذ عصر الإغريق، فصرنا نعرف الآن أنه في غياب الأدلة التجريبية، يستحيل التيقُّن مما يوجد في هذه النطاقات الدقيقة التي نبغي فهمها، لكن حتى في ظل غياب القياسات، يمكن للأدلة النظرية أن ترشدنا فيما نجريه من استكشافات، وتشير إلينا بالنهج الذي يمكن أن تنهجه القوى والمادة عند نطاقات الأطوال الأدق حجمًا. ويمكننا التحقق من الاحتمالات التي يمكن أن تساعد في تفسير الظواهر التي تحدث عند نطاقات قابلة للقياس، والربط بينها، حتى إن لم يكن من الممكن الوصول للمكونات الأساسية على نحو مباشر.

لا نعلم إلى الآن أيٌّ من أفكارنا التنبُّئية النظرية ستثبت صحتها، هذا إن حقَّقت أيٌّ منها ذلك بالفعل. لكن حتى دون الوصول مباشَرةً للمسافات الصغيرة للغاية عن طريق التجارب، فإن النطاقات التي لاحظناها تقيِّد ما يمكن أن يوجد باستمرار؛ وذلك لأنها تمثِّل النظرية الأساسية التي تحدِّد في النهاية ما نراه. ومعنى ذلك أن النتائج التجريبية — حتى في نطاقات المسافات الكبرى — تحدُّ من الاحتمالات وتحفِّزنا على التكهُّن في اتجاهات محددة.

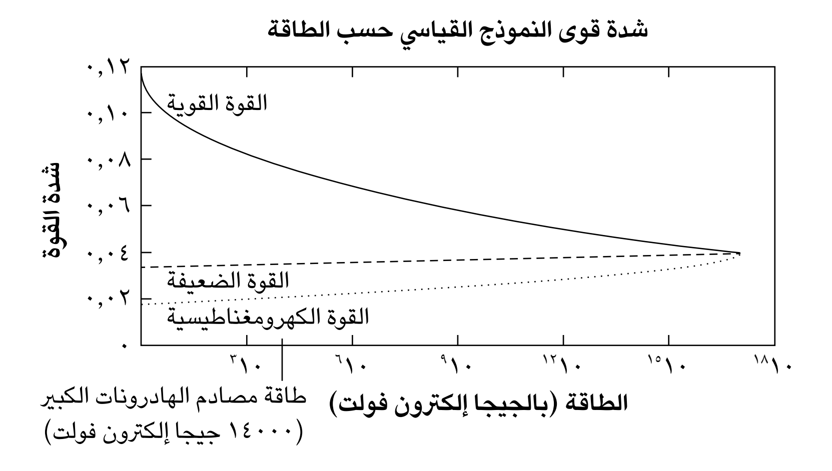
وبما أننا لم نستكشف بعدُ هذه الطاقات، فمعلوماتنا عنها محدودة. ويتكهن البعض أيضًا بوجود فراغ هائل — أي ندرة في الطاقات والأطوال ذات الأهمية — بين الطاقات والأطوال الموجودة في مصادم الهادرونات الكبير وتلك التي تنطبق على مسافات أقصر أو طاقات أعلى. ولعل ذلك يرجع إلى افتقار للخيال أو البيانات المستخدمة، لكن في نظر الكثيرين، النطاق المثير التالي يتعلَّق ﺑ «التوحيد».

فأحد أكثر التوقعات إثارةً بشأن المسافات القصيرة يتعلَّق بتوحيد القوى على المسافات القصيرة، وهو المبدأ الذي يشحذ المخيلة العلمية ومخيلة العامة على حدٍّ سواء. وفقًا لهذا السيناريو، يفشل العالم الذي نراه من حولنا في الكشف عن النظرية الجوهرية الأساسية التي تضم جميع القوى المعروفة (أو على الأقل جميع القوى بخلاف الجاذبية) وما تتسم به من جمال وبساطة. وقد عمد الكثير من الفيزيائيين إلى البحث بكدٍّ عن مثل هذا التوحيد منذ إدراك وجود أكثر من قوة واحدة للمرة الأولى.

وأحد أكثر هذه التوقعات إثارةً وضَعَها هوارد جورجي وشيلدون جلاشو في عام ١٩٧٤. اقترح هذان العالمان أنه بالرغم من ملاحظتنا ثلاث قوًى مميزة غير الجاذبية تتمتع بقدرات مختلفة (وهي القوة الكهرومغناطيسية، والقوة النووية الضعيفة، والقوة النووية القوية) في طاقات منخفضة، فإن قوة وحيدة ذات قدرة واحدة هي التي توجد في الطاقات العالية (انظر الشكل ٥-٧).[5] وسُمِّيت هذه القوة الواحدة بالقوة الموحدة؛ لأنها تجمع بين القوى الثلاث المعروفة، وعُرِف هذا التوقُّع باسم «نظرية التوحيد العظمى»، لإعجاب جورجي وجلاشو بهذا الاسم.

يبدو أن احتمالية تقارب شدة القوى تتجاوز كونها توقعًا؛ إذ ترجح الحسابات المستندة إلى ميكانيكا الكم والنسبية الخاصة أن يكون هذا هو الواقع بالفعل.[6] لكن نطاق الطاقة الذي يمكن أن يحدث فيه هذا التقارب أعلى بكثير من الطاقات التي يمكننا دراستها باستخدام تجارب المصادمات، والمسافات التي يمكن أن تعمل فيها القوة الموحدة تبلغ حوالي $١٠^{-٣٠}$سم. ومع أن هذا الحجم أبعد ما يكون عن أي شيء يمكننا ملاحظته مباشَرَةً، يمكننا البحث عن النتائج غير المباشرة لهذا التوحيد بين القوى.

ومن بين هذه النتائج المحتملة تحلل البروتون. وفقًا لنظرية جورجي وجلاشو — التي تقترح تفاعلات جديدة بين الكواركات واللبتونات — من المفترض أن البروتونات تتحلَّل، ومع الوضع في الاعتبار الطبيعة الخاصة لاقتراح هذين العالِمَين، يمكن للفيزيائيين حساب معدل حدوث هذا التحلل، لكن لم يُعثَر حتى الآن على أي دليل تجريبي على



شكل ٥-٧: في ظل الطاقة العالية، قد تتساوى شدة القوى الثلاث المعروفة غير الجاذبية؛ ومن ثَمَّ يمكن أن تتوحد في قوة واحدة.

التوحيد، بعيدًا عن اقتراح جورجي وجلاشو، ولا يعني ذلك بالضرورة خطأ فكرة التوحيد؛ فربما تكون النظرية أكثر تعقيدًا مما اقترحاه.

توضِّح دراسة التوحيد أن بإمكاننا توسيعَ نطاقِ معرفتنا ليتجاوز حدود النطاقات التي نلاحظها ملاحظةً مباشِرة. فباستخدام النظريات، يمكننا استنتاج ما تأكَّدنا تجريبيًّا من أنه طاقات لا يمكن الوصول إليها. وأحيانًا، يحالفنا الحظ، فتفرض التجارب الجيدة نفسها، ما يسمح لنا باختبار ما إذا كان ما توصَّلنا إليه من استنتاجات يتفق مع البيانات أم إنها استنتاجات ساذجة. ففي حالة نظريات التوحيد الكبرى، سمحت تجاربُ تحلُّلِ البروتونات للعلماء بالدراسة غير المباشرة للتفاعلات عند مسافات أدق مما يُسمَح بملاحظتها مباشرةً. وأحد الدروس المستفادة من هذا المثال هو أننا نحصل أحيانًا على معلومات دقيقة مهمة بشأن المادة والقوى، بل نصل أيضًا إلى سبل لتوسيع نطاق آثار تجاربنا لتشمل الطاقات الأعلى والظواهر الأكثر شمولًا، عن طريق التنبؤ بنطاقات المسافات التي تبدو للوهلة الأولى أبعد من أن تكون ذات صلة.

المحطة التالية (والأخيرة) في رحلتنا النظرية هي المسافة المعروفة باسم «طول بلانك»، والتي تبلغ $١٠^{-٣٣}$سم. ولكي تدرك مدى صِغَر هذه المسافة، لك أن تتخيَّل أن النسبة بين حجمها إلى حجم البروتون تشبه نسبة حجم البروتون إلى عرض جزيرة رود آيلاند. وفي هذا النطاق، من المرجح ألَّا تنطبق أمور جوهرية مثل مفهومَي الزمان والمكان الأساسيين، بل إننا لا نعرف كيف نتخيَّل تجربة افتراضية لفحص مسافات أصغر من طول بلانك؛ فهو أصغر النطاقات التي يمكننا تصوُّرها.

هذا الافتقار للفحص الدقيق التجريبي لطول بلانك يمكن أن يتجاوز كونه مظهرًا لمحدودية الخيال أو التكنولوجيا أو حتى التمويل لدينا، فعدم القدرة على الوصول إلى المسافات الصغيرة يمكن أن يكون قيدًا حقيقيًّا تفرضه قوانين الفيزياء. ومثلما سنرى في الفصل التالي، توضِّح لنا ميكانيكا الكم أن الفحص الدقيق للمسافات الصغيرة يتطلب طاقات عالية، لكن بمجرد أن تصير الطاقة المُحاصَرة في منطقةٍ صغيرةٍ كبيرةً للغاية، تنهار المادة مخلفة ثقبًا أسود، وفي هذه المرحلة، تكون الغلبة للجاذبية، وتؤدي زيادة الطاقة إلى جعل الثقوب السوداء أكبر حجمًا، وليس أصغر، وهو الأمر الاعتيادي في المواقف العيانية المألوفة حيث تلعب ميكانيكا الكم دورًا محدودًا وحسب. نحن لا نعلم كيف نستكشف أي مسافة أصغر من طول بلانك. وزيادة الطاقة لا تفيد، كما أن الأفكار التقليدية بشأن الفضاء لا تنطبق على هذا الحجم الدقيق.

في محاضرة ألقيتُها مؤخَّرًا، وبعد أن أوضحت الوضع الراهن لفيزياء الجسيمات واقتراحاتنا بشأن الطبيعة المحتملة للأبعاد الإضافية، ذكَّرني أحد الأشخاص بعبارة كنتُ قد نسيت تصريحي بها عن الحدود المحتملة لمفهوم الزمكان، وسُئِلت كيف يمكنني التوفيق بين التكهُّنات المتعلقة بالأبعاد الإضافية وفكرة تعطُّل الزمكان.

إن تكهُّنات تعطُّل المكان، وربما الزمان، لا تنطبق إلا عند طول بلانك الدقيق غير القابل للملاحظة، وبما أنه ما من نطاقات أصغر من $١٠^{-١٧}$ قد رصدت من قبلُ، فإن متطلب الهندسة المرنة عند مسافات يمكن قياسها لم يُنتهَك. فحتى وإن كان مفهوم المكان نفسه قد تعطَّل عند نطاق بلانك، يظل هذا النطاق أصغر بكثير من الأطوال التي نستكشفها، وما من عدم اتساق طالما أن هيكلًا مرنًا يمكن التعرُّف عليه يظهر في نطاقات أكبر وقابلة للملاحظة. وفي النهاية، يكون للنطاقات المختلفة سلوكيات متباينة، فيمكن لأينشتاين التحدُّث عن الهندسة المرنة للفضاء على نطاقات كبيرة، لكن أفكاره يمكن أن تنطبق أيضًا على النطاقات الأصغر حجمًا، طالما أنها دقيقة للغاية وتؤدي إلى

آثار مهمة على النطاقات القابلة للقياس، بحيث يمكن أن يكون للمكونات الأكثر جوهريةً تأثيرٌ قابلٌ للتمييز يمكننا ملاحظته.

وبغض النظر عمَّا إذا كان تعطُّلُ الزمكان صحيحًا أم لا، فإن إحدى الخصائص المهمة لطول بلانك التي من المؤكد أن تُثبِت لنا المعادلاتُ صحتَها، هي أنه عند هذه المسافة، ستصير الجاذبية — التي تتسم بقدرتها الضعيفة عند تأثيرها على الجسيمات الأساسية عند مسافات يمكننا قياسها — قوة قوية مكافئة للقوى الأخرى التي نعرفها. فعند طول بلانك، لا تنطبق الصيغة القياسية للجاذبية وفقًا لنظرية النسبية لأينشتاين. وعلى عكس المسافات الكبرى التي نعرف كيف نُجرِي بشأنها التنبؤات بحيث تتَّفِق جيدًا مع القياسات، لا تتسق ميكانيكا الكم والنسبية عندما نطبِّق النظريات التي نستخدمها بوجه عام في هذا النظام الدقيق، بل إننا لا نعلم كيف نحاول إجراء التنبؤات. تقوم النسبية العامة على الهندسة المكانية الكلاسيكية. وعند طول بلانك، يمكن للتفاوتات الكمية أن تتسبَّبَ في تكوُّن زبد الزمكان ببنية كبيرة للغاية تمنع تطبيق الصيغة التقليدية للجاذبية عليه.

لذا، ولكي نتناول التنبؤات الفيزيائية في نطاق بلانك، نحتاج إلى إطار مفاهيمي جديد يجمع بين ميكانيكا الكم والجاذبية في نظرية واحدة أكثر شمولًا تُعرَف باسم «الجاذبية الكمية». والقوانين الفيزيائية التي تنطبق بفعالية على نطاق الكم لا بد أن تكون مختلفة كليةً عن القوانين التي أثبتت نجاحها مع النطاقات القابلة للرصد، وفهم هذا النطاق من المحتمل أن يتضمَّنَ تحوُّلًا جوهريًّا في النموذج الفكري، شأنه شأن التحول من الميكانيكا الكلاسيكية إلى ميكانيكا الكم. وحتى إن لم نتمكن من إجراء القياسات عند أدق المسافات، أمامنا فرصة لمعرفة النظرية الأساسية للجاذبية، والمكان، والزمان، من خلال التكهنات النظرية التي تتطور باستمرار.

ومن أكثر النظريات المرشَّحة لأداء هذا الدور «نظرية الأوتار». صيغت نظرية الأوتار، في الأصل، كنظرية تستبدل الأوتار الأساسية بالجسيمات الأساسية، ونحن نعلم الآن أن هذه النظرية تتضمن أجسامًا رئيسية غير الأوتار (سوف نتعرف على مزيد من المعلومات حول هذا الأمر في الفصل السابع عشر)، وفي بعض الأحيان، يُستخدَم اسم «النظرية M» الأكثر شمولًا (وإن كان أقل وضوحًا) بدلًا من اسم نظرية الأوتار. وهذه النظرية تُعَدُّ الآن أكثر الاقتراحات الواعدة في التعامل مع مسألة الجاذبية الكمية.

لكن نظرية الأوتار تفرض تحديات رياضية ومفاهيمية هائلة، فما من أحد يعلم بعدُ كيفية صياغة نظرية الأوتار للإجابة عن كل الأسئلة التي نود أن تجيب عنها نظرية

الجاذبية الكمية. بالإضافة إلى ذلك، من المرجح أن يتجاوز نطاقُ الأوتار البالغ $١٠^{-٣٣}$ حدودَ ما يمكن لأي تجربة التفكير فيه.

وهكذا، قد يتوارد على الذهن سؤال منطقي يتعلَّق بما إذا كانت دراسة نظرية الأوتار تستحق ما يُبذَل فيها من وقت وموارد أم لا. كثيرًا ما يُطرَح عليَّ هذا السؤال: ما الذي يدفع أي شخص لدراسة نظرية من المستبعد تمامًا أن تؤدي إلى نتائج تجريبية؟ يرى بعض الفيزيائيين الاتساق الرياضي والنظري سببًا كافيًا لدراسة هذه النظرية، وهذه الفئة من العلماء تعتقد أن بإمكانهم تكرار النجاح الذي حقَّقه أينشتاين عند تطويره نظرية النسبية العامة التي اعتمد فيها إلى حدٍّ كبيرٍ على الدراسات النظرية والرياضية الخالصة.

لكن هناك دافعًا آخَر لدراسة نظرية الأوتار، وهو ما أراه مهمًّا للغاية، هذا الدافع هو أن هذه النظرية يمكن أن تقدِّم — بل قدَّمَتْ بالفعل — أساليبَ جديدة لتناول الأفكار التي تنطبق على النطاقات القابلة للقياس، ومن هذه الأفكار «التناظر الفائق» ونظريات «الأبعاد الإضافية» التي سنستعرضها في الفصل السابع عشر، وهذه النظريات يكون لها نتائج تجريبية بالفعل في حال تناولها مسائل فيزياء الجسيمات. وفي الواقع، إذا أثبتت بعض نظرياتِ الأبعاد الإضافية صحتَها، وفسَّرَتِ الظواهرَ التي نشهدها عند طاقات مصادم الهادرونات الكبير، يمكن أن تظهر أدلة نظرية الأوتار في نطاق الطاقات الأضعف من طاقات المصادم بكثير. لن يكون اكتشاف التناظر الفائق أو الأبعاد الإضافية دليلًا على صحة نظرية الأوتار، لكنه سيثبت صحة فائدة العمل على الأفكار المجردة، بما في ذلك الأفكار التي ليست لها نتائج تجريبية مباشرة، هذا بالطبع فضلًا عن كونه شاهدًا على فائدة التجارب في الفحص الدقيق للأفكار، حتى تلك التي تبدو للوهلة الأولى أفكارًا مجردة.

الفصل السادس

الإيمان بما «نراه»

لم يتمكن العلماء من حل لغز تكوين المادة إلا بعد تطوير أدوات مكَّنَتْهم من النظر داخلها، وكلمة «النظر» هنا لا تشير إلى الملاحظات المباشِرة، لكن إلى الأساليب غير المباشرة التي نتبعها لاستكشاف الأحجام الدقيقة التي لا يمكن الوصول إليها بالعين المجردة.

نادرًا ما يكون ذلك سهلًا، لكن برغم التحديات والنتائج المناقضة للبديهة التي تُسفِر عنها التجارب أحيانًا، فإن الواقع يفرض نفسه. فيمكن للقوانين الفيزيائية — حتى على مستوى النطاقات الدقيقة — أن تؤدِّي إلى نتائج قابلة للقياس تُصبِح في النهاية قابلةً للوصول إليها بالاستقصاءات الأكثر براعةً. وما نتمتع به حاليًّا من معرفة بشأن المادة وكيفية تفاعلها، هو نتاج تراكم سنوات عديدة من الفحص الدقيق والابتكار والتطور النظري الذي سمح لنا بأن نفسِّر على نحو مُتَّسِق العديدَ من نتائج التجارب. وبفضل الملاحظات غير المباشِرة، استدلَّ الفيزيائيون — وفي مقدمتهم جاليليو منذ قرون مضت — على ما يوجد داخل المادة.

سنتناول الآن الوضع الحالي لفيزياء الجسيمات والأفكار النظرية والاكتشافات التجريبية التي أدَّتْ جمعيها إلى ما نحن عليه الآن. ولا مناص أن يتخذ الوصف هنا شكل القائمة؛ إذ إنني سأعدِّد المكونات التي تتألَّفُ منها المادة التي نعرفها وكيفية اكتشاف هذه المكونات، وتكون هذه القائمة أكثر إثارةً للاهتمام عندما نتذكَّر السلوكيات المتباينة تمامًا لهذه المكوِّنات المتنوعة على النطاقات المختلفة. على سبيل المثال، الكرسي الذي تجلس عليه الآن يمكن اختزاله إلى هذه العناصر، لكن ثمَّةَ سلسلة طويلة من الاكتشافات التي تنقلنا من هذا المستوى إلى ذاك.

يحضرني هنا ما قاله ريتشارد فاينمان، على نحو يفتقر للتهذيب، عند تحدُّثه عن إحدى نظرياته: «إذا لم يكن ذلك يروق لك، فَلْترحلْ إلى مكان آخَر، ربما إلى كون

آخَر حيث القوانين أكثر بساطةً ... وسأصف لك كيف يكون حال مَن يسعون جاهدين لتحقيق الفهم. وإن لم يكن ذلك يروق لك، فهذا أمر سيئ للغاية.»[1] قد تعتقد أن بعض ما نؤمن بصحته على قدر من الجنون والإزعاج يجعلك لا ترغب في قبوله، لكن ذلك لن يغيِّر من حقيقة أن هذه هي الكيفية التي تسير بها أحوال الطبيعة.

الأطوال الموجية القصيرة

تبدو المسافات القصيرة غريبةً لأنها غير مألوفة، ونحن بحاجة إلى مسابير دقيقة لرصد ما يحدث في أصغر النطاقات. على سبيل المثال، الصفحة (أو الشاشة) التي تنظر إليها الآن أثناء قراءتك لهذا الكتاب تبدو مختلفة تمامًا عمَّا يكمن في قلب المادة، ويرجع ذلك إلى أن فعل الرؤية في حد ذاته يتعلَّق بملاحظة الضوء المرئي، وهذا الضوء ينبعث من الإلكترونات الموجودة في مدارات حول النوى بمركز الذرات. ومثلما يتَّضِح لنا من الشكل ٥-٢، الطول الموجي لهذا الضوء لا يبلغ أبدًا من الصِغر ما يسمح لنا بسبر أغوار النوى.

لذا، علينا التحلِّي بمزيد من البراعة — أو القسوة، حسب وجهة نظرك للأمر — لنستكشف ما يحدث على مستوى النطاق الدقيق للنواة، ويتطلب ذلك أطوال موجية قصيرة. ولا عجب في ذلك؛ فلك أن تتخيَّل موجة افتراضية يساوي طولها الموجي حجم الكون بأكمله. لا يمكن لأي تفاعل لهذه الموجة أن يحمل معلومات تكفي لتحديد مكان أي شيء في الفضاء، وإذا لم تحتوِ هذه الموجة على ذبذبات أصغر حجمًا تمكِّننا من تحليل بنية الكون، فلا سبيل أمامنا لتحديد مكان أي شيء باستخدام هذه الموجة ذات الطول الموجي الضخم وحسب، وسيكون الأمر أشبه بتغطية كومة من الأشياء بشبكة، ثم التساؤل عن مكان محفظتك وسطها، فلا يمكنك العثور عليها إلا إذا كنتَ تتمتع بقدر كافٍ من الدقة يسمح لك بالنظر إلى الداخل على مستوى النطاقات الأصغر حجمًا.

وباستخدام الموجات، ستحتاج إلى نقاط عُلْيَا ونقاط دُنْيَا مع مسافات فاصلة صحيحة — أي تنوعات بالنطاق الذي تحاول تحليله، أيًّا كانت ماهيته — لتتمكَّنَ من التعرُّف على مكان شيء ما أو شكل هذا الشيء أو حجمه. ويمكنك التفكير في طول موجي بحجم الشبكة، فإذا كان كل ما أعرفه هو أن ثمة شيئًا داخل هذه الشبكة، فلا يمكنني التصريح إلا بأن هناك شيئًا داخل منطقة يساوي حجمها حجم الشبكة. ولإضافة أي شيء إلى هذا القول، يتطلَّبُ الأمرُ إما شبكة أصغر حجمًا أو وسيلة أخرى للبحث عن تنوعات على نطاق أكثر حساسيةً.

وتنصُّ ميكانيكا الكم على أن الموجات تقدِّم احتمالية للعثور على الجسيم في أي مكان بعينه. وهذه الموجات قد تكون موجاتٍ مرتبطةً بالضوء، أو قد تكون الموجات التي تخبرنا ميكانيكا الكم بأن كل جسيم منفرد يحملها سرًّا. والطول الموجي لهذه الموجات يوضِّح لنا الدقة المحتملة التي يمكن أن نأمل في الوصول إليها عند استخدامنا لجسيم أو إشعاع ما لفحص المسافات القصيرة.

تنص ميكانيكا الكم أيضًا على أن الأطوال الموجية القصيرة تتطلب طاقات عالية، ويرجع ذلك إلى أن ميكانيكا الكم تربط بين الترددات والطاقات، والموجات ذات أعلى مستوًى من التردد وأقصر طول موجي تحمل القدر الأعظم من الطاقة؛ ومن ثم فإن ميكانيكا الكم تربط بين الطاقات العالية والمسافات القصيرة، موضحةً أنه لا يمكن سبر أغوار المادة إلا من خلال التجارب التي تعمل في إطار طاقات عالية، وهذا هو السبب الرئيسي وراء حاجتنا إلى آلات تعجِّل من الجسيمات عند مستويات عالية من الطاقة، إذا أردنا استكشاف باطن المادة.

وتشير العلاقات الموجية الميكانيكية الكمية إلى أن الطاقات العالية تسمح لنا باستكشاف المسافات الدقيقة والتفاعلات التي تحدث فيها. ولا يمكننا دراسة هذه الأحجام الصغيرة إلا باستخدام الطاقات العالية؛ ومن ثَمَّ باستخدام الأطوال الموجية الأقصر. وعلاقة عدم اليقين في ميكانيكا الكم — التي تنص على أن المسافات القصيرة ترتبط بقيم زخم كبيرة — علاوةً على العلاقات بين الطاقة والكتلة والزخم التي تقدِّمها النسبية الخاصة، كلها تضفي دقة إلى هذه العلاقات.

فوق كل ما ذكرناه للتو، يأتي ما علَّمنا إياه أينشتاين من أن الطاقة والكتلة قابلتان للتحويل فيما بينهما؛ فعندما تتصادم الجسيمات، يمكن أن تتحوَّل كتلتها إلى طاقة؛ ومن ثَمَّ يمكن إنتاج مادة أثقل حجمًا عند المستويات الأعلى من الطاقة، لأن ط = ك س^{٢}. تعني هذه المعادلة أن الطاقة الأعلى (ط) تسمح بتكون جسيمات أثقل وزنًا ذات كتلة أكبر (ك). كما تعني أن الطاقة عامة؛ بمعنى أنها قادرة على إنتاج أي نوع من الجسيمات يمكن الوصول إليها حركيًّا (أي إنها خفيفة بما فيه الكفاية).

يوضِّح لنا ذلك أن الطاقات العالية التي نستكشفها حاليًّا تقودنا إلى أحجام أصغر، وأن ما يتكوَّن من جسيمات هو سبيلنا لفهم القوانين الفيزيائية الأساسية التي تنطبق على هذه النطاقات. وأي تفاعلات وجسيمات جديدة عالية الطاقة تظهر في نطاق المسافات القصيرة، تحمل مفاتيح حل ألغاز ما يُعرَف بالنموذج القياسي لفيزياء الجسيمات، وهو

النموذج الذي يصف فهمنا الحالي لمعظم عناصر المادة وتفاعلاتها. وسوف ننتقل الآن إلى عرض بعض أهم اكتشافات النموذج القياسي، والأساليب التي نستخدمها حاليًّا لتطوير معرفتنا بعض الشيء.

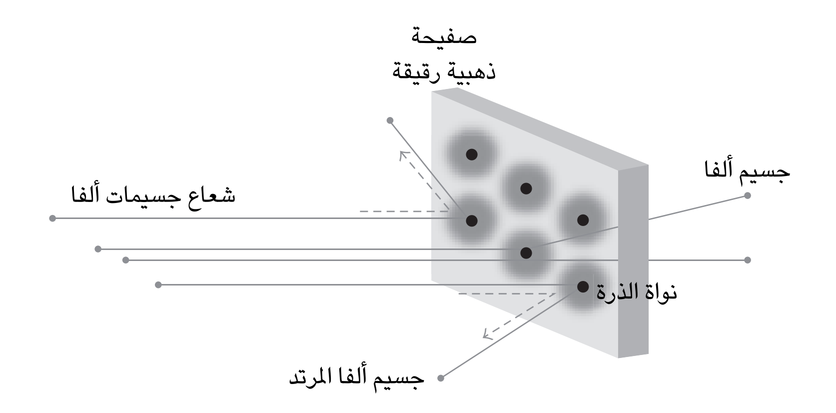
اكتشاف الإلكترونات والكواركات

لقد كُشِف الستار عن وجهتَيْ رحلتنا الأولية داخل الذرة — وهما: الإلكترونات التي تدور حول النواة، والكواركات التي ترتبط معًا بالجلوونات داخل البروتونات والنيوترونات — تجريبيًّا باستخدام مسابير تستخدم طاقات أعلى؛ ومن ثَمَّ تستكشف مسافات أقصر. ولقد رأينا أن الإلكترونات داخل الذرة ترتبط بالنواة من خلال التجاذُب المتبادَل بفعل شحناتها المتضادة، وتمنح قوة التجاذب النظام المترابط — أي الذرة — طاقةً أقل من مكوناتها الفردية المشحونة وحدها؛ لذا إذا أردنا عَزْلَ الإلكترونات ودراستها، ينبغي إضافة ما يكفي من الطاقة من أجل «تأيينها»؛ أي تحرير الإلكترونات بانتزاعها. وبمجرد أن تُعزَل الإلكترونات، يتمكَّنُ الفيزيائيون من معرفة المزيد عنها بدراسة خصائصها، مثل شحنتها وكتلتها.

وقد كان اكتشاف النواة — الجزء الآخَر من الذرة — أكثر إثارةً للدهشة؛ ففي تجربة مماثلة للتجارب التي تُجرَى على الجسيمات حاليًّا، اكتشف إرنست رذرفورد وتلميذاه النواةَ عن طريق تصويب نوى عنصر الهليوم (المعروفة آنذاك باسم جسيمات ألفا؛ لأنه لم يكن قد تَمَّ اكتشاف النواة بعدُ) نحو صفيحة ذهبية رقيقة، حملت هذه الجسيمات قدرًا من الطاقة مكَّنَ رذرفورد من التعرُّف على البنية الداخلية للنواة؛ فتوصَّلَ هو وزميلاه إلى أن جسيمات ألفا التي صوَّبوها نحو الرقاقة تشتَّتَتْ أحيانًا بزوايا أكبر بكثير مما توقَّعوه (انظر الشكل ٦-١). فقد توقَّعوا أن تتشتَّتَ النوى في وهن كما لو أنها اصطدمت بمنديل وَرَقِيٍّ، لكنهم اكتشفوا أنها ارتدت في عنف كما لو كانت قد اصطدمت بقطع من الرخام موجودة داخل الذرة. ووصف رذرفورد ما حدث قائلًا:

«كان ذلك أكثر ما شاهدته إذهالًا في حياتي على الإطلاق، لقد كان أشبه بإطلاق قذيفة عيار ١٥ بوصة على قطعة من ورق المناديل، وارتدادها لتصطدم بك. وعند التفكير في الأمر، أدركت أن هذا التشظي في الاتجاه المضاد لا بد أن يكون نتيجة تصادم فردي. وعندما أجريتُ الحسابات، توصَّلْتُ إلى أنه من المحال الحصول على أي شيء بهذا المقدار من القيمة الأُسِّيَّة، إلا إذا كنَّا نتعامل مع نظام يتركَّز فيه الجزء الأعظم من كتلة المادة في

نواة دقيقة الحجم؛ حينذاك توصَّلْتُ إلى فكرة الذرة التي تحتوي على مركز دقيق هائل القوة يحمل شحنة.»[2]



شكل ٦-١: يعرض هذا الشكل جسيمات ألفا بتجربة رذرفورد (التي نعرفها الآن باسم نوى عنصر الهليوم) المرتدة عن صفيحة ذهبية رقيقة. أوضحت الارتدادات الهائلة غير المتوقعة لبعض جسيمات ألفا وجود كتل مركزة في مراكز الذرات؛ أي النوى.

أيضًا، استنَدَ اكتشاف الكواركات داخل البروتونات والنيوترونات من خلال التجارب إلى أساليب مشابِهة لتجربة رذرفورد في بعض النواحي، لكنَّه تطلَّبَ طاقات أعلى من طاقة جسيمات ألفا التي استخدمها رذرفورد. وهذه الطاقات الأعلى تطلَّبَتْ بدورها معجِّلَ جسيماتٍ يمكنه تعجيل الإلكترونات والفوتونات التي تنبعث عن هذه الإلكترونات بقدر كافٍ من الطاقة العالية.

كان أول معجِّل جسيمات دوراني يُسمَّى «سيكلوترون»؛ نظرًا للمسارات الحلقية التي تُعجَّل فيها الجسيمات داخله. شيَّدَ إرنست لورانس أول سيكلوترون في جامعة كاليفورنيا عام ١٩٣٢، ولم يتجاوز قطر ذلك المعجِّل قدمًا، وكان ضعيفًا للغاية وفقًا للمعايير الحديثة، والطاقة التي أنتجها كانت أبعد ما يكون عن مقدار الطاقة اللازم لاكتشاف الكواركات؛ الأمر الذي لم نتمكَّنْ من تحقيقه إلا من خلال عدد من التطورات في تكنولوجيا المعجِّلات (التي أدَّتْ أيضًا إلى عدد من الاكتشافات المهمة).

وقبل استكشاف الكواركات والبنية الداخلية للنواة بفترة طويلة، حاز إميليو سيجري وأوين تشامبرلين على جائزة نوبل عام ١٩٥٩، لاكتشفاهما البروتونات المضادة في معجِّل الجسيمات «بيفاترون» في مختبر لورانس بيركلي عام ١٩٥٥. كان ذلك المعجِّل أكثر تطورًا من السيكلوترون، وتمكَّنَ من الوصول بالبروتونات إلى طاقة تزيد عن كتلة الوضع الخاصة بها بمقدار ست مرات؛ أي أكثر مما يكفي لإنتاج أزواج البروتونات والبروتونات المضادة. أصابت حزمة البروتونات في ذلك المعجِّل أهدافًا وأنتجت (باستخدام المعادلة الساحرة: ط = ك س٢) مواد عجيبة من بينها البروتونات المضادة والنيوترونات المضادة.

تلعب المادة المضادة دورًا في غاية الأهمية في فيزياء الجسيمات؛ لذا سننتقل الآن إلى تناوُل هذا النظير المتميز للمادة التي نلاحظها. بما أن مجموع شحنتَيِ المادة والمادة المضادة يساوي صفرًا، يمكن لهذين النوعين أن يفنيا عند التقائهما. على سبيل المثال، البروتونات المضادة — وهي إحدى صور المادة المضادة — يمكن أن تتَّحِد مع البروتونات لتنتج طاقةً خالصةً وفقًا لمعادلة أينشتاين ط = ك س٢.

وقد «اكتشف» الفيزيائي البريطاني بول ديراك المادة المضادة رياضيًّا لأول مرة في عام ١٩٢٧ عندما كان يحاوِل التوصُّل إلى معادلة تصف الإلكترون، والمعادلة الوحيدة التي توصَّلَ إليها وكانت تتسق في الوقت نفسه مع مبادئ التناظر المعروفة، دلَّتْ على وجود جسيم يماثِل الإلكترون في كتلته ويعارِضه في شحنته، وهو الجسيم الذي لم يَرَه أحدٌ من قبلُ.

شحذ ديراك زناد فكره كثيرًا قبل أن يعلن إذعانه لتلك المعادلة، ويعترف بحتمية وجود هذا الجسيم الغامض. واكتشف بعد ذلك الفيزيائي الأمريكي كارل آندرسون البوزيترون في عام ١٩٣٢، مُبرهِنًا على صحة ما أكده ديراك قائلًا: «لقد كانت المعادلة أكثر ذكاءً مني.» ولم تُكتشَف البروتونات المضادة — الأثقل وزنًا بكثير — إلا بعد أكثر من عشرين عامًا.

ولعب اكتشاف البروتونات المضادة دورًا مهمًّا، ليس فقط فيما يتعلَّق بتأكيد وجودها، وإنما أيضًا في إثبات تناظُر المادة والمادة المضادة في قوانين الفيزياء، وهو التناظر الضروري لكيفية عمل الكون. في نهاية الأمر، يتألَّف العالم من مادة، وليس مادة مضادة، ومعظم كتلة المادة العادية تحملها البروتونات والنيوترونات، وليس نظائرهما المضادة. وهذا اللاتناظر بين المادة والمادة المضادة يلعب دورًا مهمًّا في العالم كما نعرفه، لكننا لا نعرف إلى الآن كيفية نشوئه.

اكتشاف الكواركات

في الفترة ما بين عامَيْ ١٩٦٧ و١٩٧٣، قاد جيروم فريدمان، وهنري كيندَل، وريتشارد تيلور، سلسلةً من التجارب أثبتَتْ وجود الكواركات داخل البروتونات والنيوترونات. وقد أجرى هؤلاء العلماء أبحاثهم في معجِّل خطي كان يعجِّل الإلكترونات في خط مستقيم، على عكس مُعجِّلَيْ سيكلوترون وبيفاترون السابقين له. وقد كان المركز الذي يحوي ذلك المعجِّل يُسمَّى «مركز معجِّل ستانفورد الخطي»، وهو موجود في مدينة بالو ألتو. انبعثت فوتونات عن الإلكترونات التي عمد ذلك المعجِّل إلى تعجيلها، وتفاعلت هذه الفوتونات العالية الطاقة — ومن ثَمَّ، ذات الطول الموجي القصير — مع الكواركات داخل النوى. قاس فرديمان وكيندل وتيلور التغيُّر في معدل التفاعل عند زيادة طاقة التصادم، وتوصَّلوا إلى أنه في غياب البنية الداخلية للجسيم ينخفض معدل التفاعل، أما في وجود بنية داخلية للجسيم، ينخفض معدل التفاعل لكن على نحو أبطأ بكثير مقارَنَةً بالحال عند غيابها. ومثلما حدث في اكتشاف رذرفورد للنواة قبل ذلك الحين بسنوات عدة، تشتَّتَ الجسيم المقذوف (الفوتون في هذه الحالة) على نحو مختلف عمَّا هو الحال إذا كان البروتون مجرد جسيم أصم يفتقر إلى البنية الداخلية.

لكن حتى مع إجراء التجارب بالقدر المطلوب من الطاقة، لم يتوصَّلِ العلماء إلى الكواركات على الفور؛ فكان لا بد من تقدُّم الجانبين التكنولوجي والنظري إلى مرحلة يمكن معها التكهُّن بنتائج التجارب واستيعابها، فأوضحت التجارب والتحليلات النظرية الدقيقة، التي أجراها الفيزيائيان النظريان جيمس بجوركين وريتشارد فاينمان، أن المعدلات وافَقَتِ التنبؤات الخاصة بوجود بنية داخلية للنواة؛ ومن ثَمَّ أثبتَتِ اكتشاف بنية داخل البروتونات والنيوترونات؛ ألا وهي الكواركات. وبفضل هذا الاكتشاف، حاز فريدمان وكيندل وتيلور على جائزة نوبل عام ١٩٩٠.

ما كان أحدٌ ليأمل في استخدام عينيه المجردتين لرؤية الكوارك أو خصائصه على نحو مباشِر، وكان لا بد من اتباع الأساليب غير المباشرة، ومع ذلك أثبتت القياسات وجود الكواركات؛ فقد تأكَّدَ وجودها بفضل التوافق بين التنبؤات والخصائص التي تم قياسها، وأيضًا بفضل الطبيعة التفسيرية لفرضية الكوارك قبل كل شيء.

طوَّر الفيزيائيون والمهندسون بمرور الوقت أنواعًا مختلفة وأعلى جودةً من المعجِّلات، تتناول نطاقات تتزايد كبرًا، بحيث تعجِّل الجسيمات عند مستويات أعلى من الطاقة؛ فأنتجت المعجِّلات الأكبر والأعلى جودةً جسيماتٍ عاليةَ الطاقة استُخدِمت

لاستكشاف البنى على نطاق مسافات تتزايد قصرًا. والاكتشافات التي حقَّقتها هذه المعجِّلات شكَّلت «النموذج القياسي» بكشفها الستار عن كل عنصر من عناصره.

التجارب الثابتة الأهداف في مقابل مصادمات الجسيمات

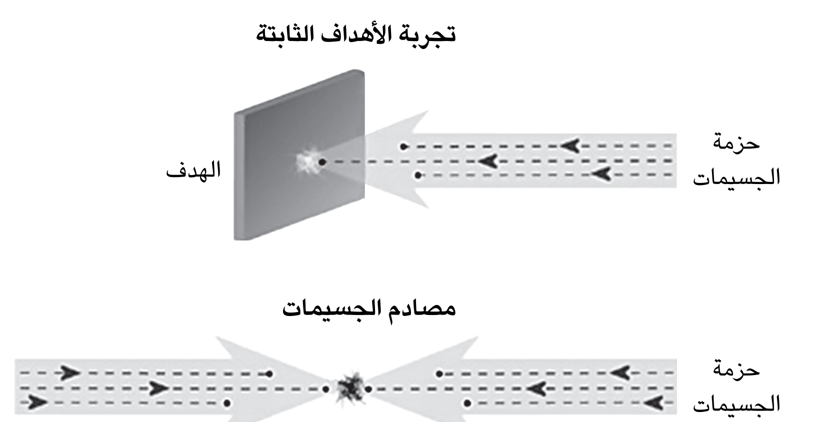
تُعرَف التجارب التي أدَّتْ إلى اكتشاف الكواركات — والتي يتم فيها توجيه حزمة الإلكترونات المعجَّلة نحو مادة ثابتة — بالتجارب «ثابتة الأهداف»، وتتضمن هذه التجارب حزمة واحدة من الإلكترونات تُوجَّه نحو مادة تمثِّل هدفًا سهلًا.

لكن تختلف هذه التجارب عن المعجِّلات الحالية التي تعمل عند أعلى مستويات الطاقة، فتنطوي هذه المعجِّلات على تصادمات بين حزمتين من الجسيمات تم تعجيلهما عند مستوًى عالٍ من الطاقة (انظر الشكل ٦-٢ للاطلاع على مقارنة). ومثلما هو متصوَّر، ينبغي أن تكون هاتان الحزمتان متركزتين تركيزًا عاليًا في مساحة صغيرة لضمان حدوث التصادمات، ويؤدي ذلك إلى انخفاض عدد التصادمات التي يمكن توقُّعها انخفاضًا كبيرًا؛ نظرًا لأن تفاعل إحدى الحزمتين مع كتلة من المادة يفوق احتمال تفاعلها مع الحزمة الأخرى.

لكن ثمة ميزة مهمة تتسم بها التصادمات بين حزمتين، وهي أن بإمكان هذه التصادمات الوصول إلى مستويات أعلى من الطاقة. ولعل أينشتاين كان من الممكن أن يخبرنا الآن بسبب تميُّز المصادمات عن التجارب الثابتة الأهداف، فيرجع هذا التميز إلى ما يُعرَف باسم «الكتلة الثابتة» للنظام. ورغم اشتهار أينشتاين بنظرية «النسبية»، فقد رأى ذلك العالم أن الاسم الأنسب لها هو «النظرية الثابتة»، فكان الهدف الحقيقي لأبحاثه هو التوصُّل إلى طريقة تمكِّننا من تجنُّب الانخداع بإطارٍ مرجعيٍّ معينٍ، والتوصُّل إلى الكميات الثابتة التي يتميز بها النظام.

لعلك ستدرك هذه الفكرة على نحو أوضح عند تطبيقها على الكميات المكانية، مثل الطول؛ فطول أي جسم ساكن لا يعتمد على موضعه في المكان، فالجسم له حجم ثابت لا علاقة له بك أو بملاحظاتك، على عكس إحداثياته التي تعتمد على مجموعة تقديرية من المحاور والاتجاهات التي تحدِّدها أنت.

أوضح أينشتاين، كذلك، كيفيةَ وصف الأحداث على نحو لا يعتمد على موضع الراصد أو حركته. والكتلة الثابتة مقياس للطاقة الكلية؛ فتوضِّح لنا مدى ضخامة الجسم الذي يمكن أن ينشأ عن الطاقة التي يحتوي عليها النظام.



شكل ٦-٢: تعمل بعض معجِّلات الجسيمات على إحداث تصادمات بين حزمة جسيمات وهدف ثابت، في حين تعمل معجِّلات أخرى على إحداث تصادمات بين حزمتين من الجسيمات.

ولتحديد حجم الكتلة الثابتة، يمكن طرح هذا السؤال: إذا كان النظام ثابتًا — بعبارة أخرى، إذا لم يكن ينطوي على أي سرعة كلية أو زخم كلي — فما مقدار الطاقة التي سيحتوي عليها؟ إذا لم يكن للنظام زخم على الإطلاق، فستنطبق في هذه الحالة معادلة أينشتاين ط = ك س^٢؛ ومن ثَمَّ فإن معرفة طاقة أي نظام مستقر تساوي معرفة كتلته الثابتة، وعندما لا يكون النظام مستقرًّا، يلزم استخدام صورة أكثر تعقيدًا من هذه المعادلة، وهي الصورة التي تعتمد على قيمة الزخم والطاقة أيضًا.

لنفترض، مثلًا، أننا أحدثنا تصادمًا بين حزمتين تحملان القدر نفسه من الطاقة، ولهما نفس الزخم، لكن بقيمة مضادة. سوف تتصادمان، ويبلغ حاصل جمع زخمهما صفرًا، يعني ذلك أن النظام بأكمله مستقر بالفعل؛ ومن ثَمَّ فإن إجمالي الطاقة — مجموع طاقة الجسيمات داخل الحزمتين — يمكن تحويله إلى كتلة.

أما التجارب الثابتة الأهداف، فتختلف كليةً عن ذلك؛ إذ يكون زخم الحزمة كبيرًا، في حين لا يكون للهدف أي زخم. ولا تُستغَل كل الطاقة لإنتاج جسيمات جديدة، لأن النظام الذي يجمع بين الهدف وحزمة الجسيمات المصطدمة به يظل مستمرًّا في الحركة. ونظرًا

لهذه الحركة، لا يمكن تحويل كل الطاقة الناتجة عن التصادم إلى جسيمات جديدة؛ لأن بعض الطاقة تظل في صورة طاقة حركية. وقد تبيَّنَ أن الطاقة التي تتوفر لتكوين الجسيمات تساوي الجذر التربيعي فقط لناتج طاقة الحزمة والهدف، ومعنى ذلك أنه — على سبيل المثال — في حالة رفع مستوى الطاقة لحزمة البروتون بمقدار ١٠٠ مرة ومصادَمَتِها ببروتونٍ ساكنٍ، فإن الطاقة التي ستتوفر لتكوين جسيمات جديدة ستزيد بمقدار عشر مرات فقط.

يوضِّح لنا ذلك أن ثمة اختلافًا هائلًا بين تصادمات الأهداف الثابتة والتصادمات بين حزم الجسيمات، فمقدار الطاقة الناتجة عن تصادم حزمتَيْ جسيمات أكبر بكثير من ضِعف الطاقة الناتجة عن تصادم حزمة جسيمات بهدف ثابت. ولعلك افترضت ذلك على الأرجح، لكن هذا الافتراض يستند إلى أسلوب تفكير نيوتن الذي لا ينطبق على الجسيمات النسبية في الحزمة التي تتحرك بسرعة الضوء تقريبًا. فالفارق في صافي الطاقة الناتجة عن تصادمات الأهداف الثابتة والتصادمات بين الحزم، أكبر بكثير مما يمكن افتراضه؛ وذلك لأنه مع السرعة المقاربة لسرعة الضوء، يظهر مفهوم النسبية. لذا، عندما نرغب في الوصول إلى مستويات مرتفعة من الطاقة، لا يكون أمامنا خيار سوى اللجوء لمصادمات الجسيمات التي تعمل على تعجيل حزمتين من الجسيمات عند مستوًى عالٍ من الطاقة قبل إحداث التصادم بينهما. وتعجيل حزمتين معًا يسمح بتحقيق مستوًى أعلى من الطاقة؛ ومن ثَمَّ إحداث تصادمات أكثر تأثيرًا.

ومصادم الهادرونات الكبير أحد نماذج مصادمات الجسيمات، ويعمل هذا المصادم على إحداث تصادُم بين حزمتين من الجسيمات توجِّههما المغناطيسات بحيث تستهدف كلٌّ منهما الأخرى. وتتمثل المعايير الأساسية المحددة لقدرات المصادمات — مثل مصادم الهادرونات الكبير — في: نوع الجسيمات المتصادِمة، وطاقتها بعد التعجيل، و«درجة سطوع» الماكينة (أي قوة الحزمتين المجتمعتين؛ ومن ثَمَّ عدد أحداث التصادم التي تقع).

أنواع المصادمات

بعد أن توصَّلْنا إلى أن تصادُمَ حزمتين يمكن أن ينتج عنه قدر أكبر من الطاقة (ومن ثَمَّ يمكِّننا من استكشاف مسافات أقصر) مقارَنَةً بالتجارب الثابتة الأهداف، يكون السؤال التالي هو: ما الذي سنُجرِي له التصادم؟ يقودنا هذا السؤال إلى بعض الخيارات المثيرة للاهتمام. بالتحديد، علينا أن نقرِّر نوع الجسيمات التي سنقوم بتعجيلها لتشارك بعد ذلك في عملية التصادم.

من الأفكار الجيدة استخدامُ مادة متوفرة بالفعل على سطح الأرض. يمكننا، من الناحية النظرية، مصادمة جسيمات غير مستقرة معًا، مثل الجسيمات المعروفة باسم «الميوونات» التي تتحلل سريعًا إلى إلكترونات، أو مصادمة الكواركات الثقيلة، مثل الكواركات القميَّة التي تتحلل إلى مادة أخف وزنًا.

في هذه الحالة، سيلزم علينا إنتاج هذه الجسيمات أولًا في المختبر؛ لأنها ليست متوفرة بشكل مباشر، لكن حتى إن قمنا بإنتاجها وتعجيلها قبل تحلُّلها، سيلزم علينا التأكُّد من أن الإشعاع الناجم عن التحلل سينحرف بأمان. جميع هذه المشكلات يمكن تخطِّيها، خاصةً في حالة الميوونات التي لا تزال جدوى استخدامها كحزمة جسيماتٍ خاضعةً للبحث، لكنها لا ريب تفرض مزيدًا من التحديات التي لا نواجِهها مع الجسيمات المستقرة.

بناءً على ما سبق، سنبدأ بالخيار الأكثر وضوحًا؛ أَلَا وهو الجسيمات المستقرة المتوفرة على سطح الأرض ولا تتحلل، ونعني بذلك جسيمات الضوء أو على الأقل التكوينات المستقرة المترابطة لجسيمات الضوء، مثل البروتونات. سيتطلب الأمر، كذلك، أن تحمل الجسيمات شحنة كهربائية، ليكون من الممكن تعجيلها باستخدام مجال كهربائي. يتركنا ذلك أمام خيارين هما البروتونات والإلكترونات، وهي الجسيمات التي توجد بوفرة.

أيهما نختار؟ كلٌّ منهما له مميزاته وعيوبه. ميزة الإلكترونات أنها تؤدي إلى تصادمات جيدة وواضحة، وهي أيضًا جسيمات أساسية، وعندما نُحدِث تصادمًا بين إلكترون وشيء آخَر، لا يُقسِّم الإلكترون طاقته على العديد من البنى الثانوية. فبقدر ما نعلم، لا يوجد بنى ثانوية داخل الإلكترون، ولما كان الإلكترون لا ينقسم، يمكننا متابعة ما يحدث عند تصادمه مع أي شيء آخَر متابعةً دقيقةً.

لا ينطبق ذلك على البروتونات. ويمكننا أن نذكر هنا ما أوضحناه في الفصل الخامس من أن البروتونات تتكون من ثلاثة كواركات تربطها معًا قوة نووية قوية، من خلال تبادل الجلوونات بين الكواركات بحيث «تلصق» كل هذه الأجزاء معًا. وعندما يتصادم أحد البروتونات عند مستوًى عالٍ من الطاقة، يتضمن التفاعل المهم — أي الذي قد ينتج عنه جسيم ثقيل — جسيمًا واحدًا فقط داخل البروتون، على غرار الكوارك المنفرد.

هذا الكوارك لن يحمل، بالتأكيد، طاقة البروتون بأكملها؛ لذا حتى إن كانت طاقة البروتون عاليةً جدًّا، فستكون الطاقة التي سيحملها الكوارك أقل بكثير. سيظل الكوارك

يحمل قدرًا كبيرًا من الطاقة، لكنها ليست بالقدر نفسه الذي يمكن أن يحتوي عليه إذا نقل البروتون كل طاقته إليه.

وفوق كل ذلك، تتصف تصادمات البروتونات بالفوضى. يرجع ذلك إلى أن الجسيمات الأخرى الموجودة داخل البروتون تظل عالقةً داخله، حتى إن اشتركت في التصادم الفائق الطاقةِ الذي نهتم به. وستظل الجسيمات الباقية تتفاعل تفاعلات قوية (وهي تفاعلات خليق بها هذا الوصف)، ويعني ذلك أنه سيوجد قدر هائل من النشاط يحيط بالتفاعل الذي نهتم به (ويحجبه).

إذن، ما الذي قد يدفع أي شخص للتفكير في مصادمة البروتونات؟ ما يدفعنا للتفكير في ذلك هو أن البروتون أثقل وزنًا من الإلكترون، بل إن وزنه في الواقع يزيد بنحو ٢٠٠٠ مرة عن وزن الإلكترون، وقد ثبتت أهمية ذلك عند محاولتنا تعجيل البروتون للوصول إلى مستوًى مرتفع من الطاقة. فللوصول إلى هذا المستوى المرتفع، تعجل المجالات الكهربية الجسيمات حول حلقة بحيث تزيد درجة تعجيلها مع كل جولة متعاقبة، لكن الجسيمات المعجَّلة تبث إشعاعات، وكلما خفَّ وزنها، زاد مقدار ما تبثه من هذه الإشعاعات.

يعني ذلك أنه رغم ميلنا لمصادمة الإلكترونات الفائقة الطاقة، فإن هذا أمر مستبعد في الوقت الحالي، ويرجع ذلك إلى أنه يمكننا تعجيل الإلكترونات لتصل إلى مستويات مرتفعة للغاية من الطاقة، لكن هذه الإلكترونات العالية الطاقة تفقد نسبةً كبيرةً من طاقتها عندما تُعجَّل في دائرة (لهذا سُمِّي «مركز معجِّل ستانفورد الخطي» في بالو ألتو بولاية كاليفورنيا، الذي عمل على تعجيل الإلكترونات، بالمصادم الخطي). لذا، من حيث كلٍّ من إمكانية الاكتشاف والطاقة الخالصة، يكون للبروتونات الأفضلية، فبوسع البروتونات أن تعجَّل وصولًا إلى مستوًى عالٍ من الطاقة يسمح لمكوناتها الثانوية من الكواركات والجلوونات بحمل كمية من الطاقة تفوق تلك التي يحملها الإلكترون عند تعجيله.

وفي الواقع، توصَّلَ الفيزيائيون إلى الكثير من معرفتهم عن الجسيمات من كلا النوعين من المصادمات؛ تلك التي تصادم البروتونات والأخرى التي تصادم الإلكترونات. المصادمات التي تعجل حزمة من الإلكترونات لا تعمل بالطاقات العالية التي وصلت إليها معجِّلات البروتونات الفائقة الطاقة، لكن التجارب على المصادمات التي تتضمن حُزَم الإلكترونات توصَّلت إلى قياسات أكثرَ دقةً من أي مصادم بروتونات قد يخطر ببال

أي شخص. وعلى وجه التحديد، في تسعينيات القرن العشرين، حقَّقت التجارب التي أُجرِيت في مركز معجِّل ستانفورد الخطي ومصادم الإلكترونات–البوزيترونات الكبير (يا لهما من اسمين لا تتوقَّف بساطتهما عن إدهاشي أبدًا!) الموجودين في سيرن؛ دقةً مذهلةً في إثبات صحة تنبؤات النموذج القياسي لفيزياء الجسيمات.

وهذه التجارب التي تناولت «القياسات الدقيقة للقوة الكهروضعيفة» استفادت من العديد من العمليات المختلفة التي يمكن التنبؤ بها باستخدام المعلومات المتوفرة عن التفاعلات الكهروضعيفة. على سبيل المثال، قاست هذه التجارب كتل الأجسام الحاملة للقوة الضعيفة، ومعدلات التحلل إلى أنواع مختلفة من الجسيمات، وحالات اللاتناظر بين الجزأين الأمامي والخلفي للكواشف التي توضِّح المزيد من المعلومات عن طبيعة التفاعلات الضعيفة.

وتُطبِّق القياسات الدقيقة للقوة الكهروضعيفة فكرةَ النظرية الفعَّالة بوضوح؛ فعندما يُجرِي الفيزيائيون ما يكفي من التجارب لتحديد المتغيرات القليلة للنموذج القياسي، يصير من الممكن التنبؤ بأي شيء آخَر. يتحقَّق الفيزيائيون من اتساق جميع القياسات، ويبحثون عن الانحرافات التي من شأنها إيضاح ما إذا كان هناك شيء ما غير موجود. ووفقًا لما تَمَّ التوصُّل إليه حتى الآن، تشير القياسات إلى أن النموذج القياسي يعمل بنجاح مذهل، وهو النجاح الذي يُغنِينا عن أي أدلة نحتاج إليها لمعرفة ما لا يضمُّه النموذج القياسي من جسيمات، فيما عدا أن تأثيرات ما لا يضمه من جسيمات — أيًّا كانت — على طاقات مصادم الإلكترونات–البوزيترونات الكبير، لا بد أنها تأثيرات ضئيلة للغاية.

يتضح لنا مما سبق أنه كي نحصل على المزيد من المعلومات حول الجسيمات الثقيلة والتفاعلات العالية الطاقة، علينا إجراء أبحاث مباشِرة عند مستويات من الطاقة أعلى بكثير من المستويات التي تمَّ التوصُّل إليها في مركز معجِّل ستانفورد الخطي ومصادم الإلكترونات–البوزيترونات الكبير. فتصادمات الإلكترونات لن تصل ببساطة إلى الطاقات التي نعتقد أننا بحاجة إليها للإجابة عن سؤال: ما الذي يمنح الجسيمات كتلتها؟ ولماذا تتسم هذه الكتلة بما تتسم به من خصائص؟ على الأقل لن يحدث ذلك قريبًا؛ ومن ثَمَّ فنحن بحاجة إلى التصادمات بين البروتونات.

لذلك، قرَّرَ الفيزيائيون تعجيل البروتونات بدلًا من الإلكترونات داخل النفق الذي بُنِي في ثمانينيات القرن العشرين ليضم بين جنباته مصادم الإلكترونات–البوزيترونات

الكبير. وأوقفت في النهاية سيرن أعمال مصادم الإلكترونات–البوزيترونات الكبير لإفساح المجال للإعداد لمشروعها الضخم الجديد؛ أَلَا وهو مصادم الهادرونات الكبير. وبما أن البروتونات لا تفقد قدرًا كبيرًا من طاقتها في صورة إشعاع، فإن مصادم الهادرونات الكبير سيعزِّز من هذه الطاقة ليصل بها إلى مستويات أعلى بكثير على نحو أكثر كفاءةً. وتتصف تصادمات البروتونات بقدر من الفوضى يفوق تصادمات الإلكترونات، كما أن تجاربها تزخر بالعديد من التحديات، لكن بفضل حزم البروتونات، يمكننا الحصول على طاقات عالية بما فيه الكفاية لإيصالنا إلى الإجابات التي كنَّا نسعى إليها منذ عقود طويلة.

جسيمات أم جسيمات مضادة؟

لا يزال أمامنا سؤال آخَر علينا الإجابة عنه قبل أن نقرِّر ما سنجري التصادم له. فالتصادم يتضمن حزمتين، وما توصلنا إليه حتى الآن هو أن الطاقات العالية تفرض أن تتكون إحدى الحزمتين من البروتونات. لكن السؤال الآن هو: هل ستتكون الحزمة الأخرى من جسيمات (بروتونات) أم جسيمات مضادة (بروتونات مضادة)؟ للبروتونات والبروتونات المضادة الكتلة نفسها؛ ومن ثَمَّ فهي تبثُّ إشعاعات بالمعدل ذاته؛ لذلك لا بد من استخدام معايير أخرى لاتخاذ القرار بشأن أيٍّ منهما يلزم استخدامه.

من الجليِّ أن البروتونات تتميز بوفرتها، في حين لا نرى الكثيرَ من البروتونات المضادة حولنا، ويرجع ذلك إلى أن البروتونات المضادة تفنى مع البروتونات الوفيرة لتتحوَّل إلى طاقة أو إلى جسيمات أخرى أولية. وبناءً عليه، ما الذي قد يدفعنا لإنتاج حزمة من الجسيمات المضادة؟ ما الذي يمكن جَنْيُه من ذلك؟

لعل الإجابة عن هذا السؤال هي: الكثير. أولًا، التعجيل يكون أيسر في هذه الحالة نظرًا لإمكانية استخدام مجال مغناطيسي واحد لتوجيه البروتونات والبروتونات المضادة في اتجاهين متعارضين، لكن السبب الأهم يتعلَّق بالجسيمات التي يمكن أن تتكون نتيجة لذلك.

للبروتونات والبروتونات المضادة الكتلةُ ذاتها، لكنها تختلف في شحنتها. يعني ذلك أن الجسيم والجسيم المضاد الناتجين سيحملان الشحنة ذاتها التي تحملها الطاقة الخالصة، وهي شحنة متعادلة. وبالوضع في الاعتبار معادلة ط = ك$س^{٢}$، يكون معنى ذلك أن الجسيم والجسيم المضاد يمكن أن يتحوَّلَا إلى طاقة تكوِّن بدورها أي جسيم وجسيم مضاد معًا، شريطة ألَّا يكونا ثقيلين للغاية وأن يتحقَّقَ بينهما وبين زوج الجسيم والجسيم المضاد الأولي تفاعل قوي.

هذه الجسيمات الناتجة يمكن — من الناحية النظرية — أن تكون جسيمات جديدة وفريدة تختلف شحنتها عن شحنات جسيمات النموذج القياسي، والجسيم والجسيم المضاد المتصادمان لا يكون لهما شحنة صافية، وينطبق ذلك على الجسيم الفريد أيضًا والجسيم المضاد له. لذا، رغم أن شحنات الجسيم الفريد يمكن أن تختلف عن جسيمات النموذج القياسي، فإن زوج الجسيم والجسيم المضاد ستبلغ شحنتهما معًا صفرًا، ويمكن أن يُنتَجا من الناحية النظرية.

لنطبِّق الآن هذا المنطق على الإلكترونات. إذا أحدثنا تصادمًا بين جسيمين متساويين في الشحنة، مثل إلكترونين، فلن ينتج عنهما سوى جسيمات تتساوى في شحنتها مع الجسيمين المتصادمين (أيًّا كانا)، فيمكن أن ينتج عن هذا التصادم جسيمًا فرديًّا بشحنة صافية مقدارها اثنين أو جسيمين مختلفين، مثل إلكترونين يحمل كلٌّ منهما شحنة واحدة. وهذا أمر مُقيِّد.

إن مصادمة جسيمين يحملان الشحنة ذاتها أمر مُقيِّد للغاية. على الجانب الآخَر، مصادمة الجسيمات والجسيمات المضادة تفتح العديد من الأبواب الجديدة التي ما كان من الممكن أن تُفتَح في حال مصادمة الجسيمات فقط، ونظرًا للعدد الأكبر من الحالات النهائية الجديدة المحتملة، تتسم التصادمات بين الإلكترونات والبوزيترونات بإمكانات أكبر بكثير من التصادمات بين الإلكترونات. على سبيل المثال، التصادمات التي تحتوي على الإلكترونات والجسيمات المضادة لها — البوزيترونات — أنتجت جسيمات عديمة الشحنة، مثل البوزون القياسي Z (هكذا كان يعمل مصادم الإلكترونات-البوزيترونات الكبير)، بالإضافة إلى أي زوج من الجسيمات والجسيمات المضادة الخفيفة في وزنها لدرجة تسمح بإنتاجها. ورغم الثمن الباهظ الذي نتكبَّده عند استخدام الجسيمات المضادة في التصادمات — نظرًا لصعوبة تخزينها — فإننا نحظى بالكثير عندما تحمل الجسيمات الغريبة الجديدة، التي نطمح في اكتشافها، شحناتٍ مختلفةً عن شحنات الجسيمات التي تتصادم.

وقد استخدمت مصادِمات الطاقة العالية مؤخَّرًا حزمةً واحدةً من البروتونات وأخرى من البروتونات المضادة، وتطلب ذلك بالطبع وسيلةً لإنتاج البروتونات المضادة وتخزينها، والبروتونات المضادة المخزَّنة تخزينًا جيدًا كانت أحد أهم إنجازات سيرن، وقبل تأسيس المنظمة لمصادم الإلكترونات-البوزيترونات الكبير، أنتجت مختبراتها حُزَمَ البروتونات والبروتونات المضادة العالية الطاقة.

وأهم الاكتشافات التي أسفر عنها تصادم البروتونات والبروتونات المضادة في سيرن كانت البوزونات المقياسية الكهروضعيفة التي تعمل على توصيل القوة الكهروضعيفة، والتي حصل بفضلها كارلو روبيا وسيمون فان دير مير على جائزة نوبل عام ١٩٨٤. وكما هو الحال مع القوى الأخرى، تُنقَل القوة الضعيفة بواسطة الجسيمات، وفي هذه الحالة تُعرَف هذه الجسيمات بالبوزونات المقياسية الضعيفة (وهي بوزونات W ذات الشحنات السالبة والموجبة، وبوزونات Z الاتجاهية المتعادلة الشحنة)، وهذه الجسيمات الثلاثة مسئولة عن القوة النووية الضعيفة. ولا تزال بوزونات W وZ ترتبط في ذهني بعبارة «البوزونات الاتجاهية اللعينة» التي وصفها بها الفيزيائي البريطاني المخمور الذي أخذ يتحرك بتثاقل بين حجرات السكن الجامعي؛ حيث كان يُقِيم آنذاك الفيزيائيون الزائرون وطلبة الفصول الصيفية (وأنا من بينهم). كان ذلك العالم متخوِّفًا من السيادة التي تمتَّعَتْ بها أمريكا في هذا المجال، وكان يطمح في تحقيق أوروبا أول اكتشاف هام فيه، وعند اكتشاف البوزونات الاتجاهية W وZ في سيرن، ثبتَتْ صحة النموذج القياسي لفيزياء الجسيمات — الذي تُعَدُّ القوة الضعيفة مكوِّنًا أساسيًّا له — من خلال التجارب.

ومن العوامل المحورية التي أدَّتْ إلى نجاح هذه التجاربِ الأسلوبُ الذي طوَّره فان دير مير لتخزين البروتونات المضادة، الأمر الذي يمثِّل مهمة صعبة حقًّا؛ لأن البروتونات المضادة تسعى دومًا للعثور على بروتونات يمكن أن تتبدَّد معها. وفي العملية التي ابتكرها فان دير مير، والمعروفة باسم «التبريد العشوائي»، حركَّتِ الإشاراتُ الكهربية لمجموعة من الجسيمات جهازًا «دفَعَ» بدوره أي جسيم يتمتَّع بزخم عالٍ، ما أدَّى في النهاية إلى تبريد مجموعة الجسيمات بأكملها، فقلَّتْ سرعتها؛ ومن ثَمَّ لم تتبدَّدْ على الفور أو تصطدم بالحاوية، وتمكَّنَ بذلك فان دير مير من تخزين البروتونات المضادة.

لم تقتصر فكرة مصادم البروتونات والبروتونات المضادة على أوروبا فحسب، فأعلى هذه المصادمات في مستوى الطاقة كان مصادم تيفاترون، الذي شُيِّد في باتافيا بولاية إلينوي. وصلت الطاقة في هذا المصادم إلى ٢ تيرا إلكترون فولت (أي ما يزيد عن طاقة البروتون الساكنة بمقدار ٢٠٠٠ مرة).[3] تصادمت في هذا المصادم البروتونات والبروتونات المضادة، فأنتجت جسيمات أخرى يمكن دراستها بالتفصيل. وأهم الاكتشافات التي توصَّلَ إليها مصادم تيفاترون هو الكوارك القميُّ، وهو أثقل جسيمات النموذج القياسي التي تم اكتشافها وآخِرُها.

على الجانب الآخَر، نجد أن مصادم الهادرونات الكبير يختلف عن أول مصادم تشيده سيرن وعن تيفاترون (انظر جدول ٦-١ للاطلاع على ملخص لأنواع المصادمات). فبدلًا من البروتونات والبروتونات المضادة، يهدف مصادم الهادرونات الكبير لمصادمة حزمتين من البروتونات. والسببُ في اختيار هذا المصادِمِ التصادماتِ بين حزمتين من البروتونات بدلًا من حزمة بروتونات وأخرى من البروتونات المضادةِ؛ دقيقٌ لكنه يستحق الفهم، فأكثر التصادمات نفعًا هي تلك التي يبلغ صافي شحنة الجسيمات المتصادمة فيها صفرًا، وهذا النوع الذي تناولناه فيما سبق. فيمكنك إنتاج أي جسيم بالإضافة إلى الجسيم المضاد له (بفرض توفُّر قَدْر كافٍ من الطاقة) عندما يكون صافي الشحنة صفرًا، وإذا حدث التصادم بين إلكترونين، فسيكون صافي شحنة أي ناتج سالب اثنين، الأمر الذي يستبعد الكثير من الاحتمالات. وقد تعتقد أن مصادمة بروتونين فكرة سيئة أيضًا، ففي النهاية صافي شحنة بروتونين يساوي موجب اثنين، الأمر الذي لا يُعَدُّ تقدُّمًا هائلًا.

لو كانت البروتونات جسيمات أساسية، لَصَحَّ هذا التصوُّر، لكن البروتونات — كما أوضحنا في الفصل الخامس — تتألَّف من وحدات ثانوية، وهي الكواركات التي ترتبط معًا بالجلوونات. وحتى لو كانت الكواركات الاتجاهية الثلاثة جميعها (الكواركان العلويان والكوارك السفلي) التي تحمل شحنة البروتون متواجِدةً داخله، فلن يفيد ذلك كثيرًا؛ إذ إن إجمالي شحنة كواركين اتجاهيين لا تبلغ صفرًا أبدًا.

جدول ٦-١: يعرض هذا الجدول مقارنةً بين الأنواع المختلفة من المصادمات، مشيرًا إلى طاقة كلٍّ منها، والجسيمات التي تحقِّق التصادم بينها، وشكل المعجِّل.

مقارنة بين أنواع المصادمات المختلفة

المعجِّل/عام الافتتاح المختبر/الموقع	الجسيمات المُتصادِمة	الشكل	حجم الطاقة
مصادم ستانفورد الخطي ١٩٨٩ مصادم ستانفورد الخطي/مينلو بارك، كاليفورنيا	إلكترونات وبوزيترونات	خطي $e^- \rightarrow \leftarrow e^+$	**١٠٠ جيجا إلكترون فولت** ٣,٢ كيلومترات
تيفاترون ١٩٨٣ فيرميلاب/باتافيا، إلينوي	بروتونات وبروتونات مضادة	حلقي $p \; \bar{p}$	**١٩٦٠ جيجا إلكترون فولت** ٦,٣ كيلومترات
مصادم (مصادمات) الإلكترونات-البوزيترونات الكبير (١ و٢)* ١٩٨٩ / ٢٠٠٠ سيرن/جنيف، سويسرا	إلكترونات وبوزيترونات	حلقي $e^- \; e^+$	**٩٠ جيجا إلكترون فولت/٢٠٩ جيجا إلكترون فولت** ٢٦,٦ كيلومترًا
مصادم الهادرونات الكبير ٢٠٠٨ سيرن/جنيف، سويسرا	بروتون وبروتون	حلقي $p \; p$	**٧٠٠٠–١٤٠٠٠ جيجا إلكترون فولت** ٢٦,٦ كيلومترًا

* طُوِّر مصادم الإلكترونات-البوزيترونات الكبير ١ إلى مصادم الإلكترونات-البوزيترونات الكبير ٢

رغم ذلك، فإن معظم كتلة البروتون ليست نتاج كتلة الكواركات التي يحتوي عليها، وإنما تأتي كتلته في الأساس من الطاقة التي تعمل على ربط أجزائه معًا. والبروتون، الذي ينتقل بزخم عالٍ، يحتوي على قدر كبير من الطاقة، وفي ظل هذا القدر الكبير من الطاقة، تحتوي البروتونات على بحر من الكواركات والكواركات المضادة والجلوونات، بالإضافة إلى ثلاثة كواركات اتجاهية مسئولة عن شحنة هذه البروتونات. ومعنى ذلك أنك إذا فحصت بروتونًا عالي الطاقة، فلن تجد ثلاثة كواركات اتجاهية فحسب، وإنما ستجد أيضًا بحرًا من الكواركات والكواركات المضادة والجلوونات التي يبلغ مجموع شحناتها صفرًا.

ومن ثَمَّ، عندما نفكِّر في استخدام تصادمات البروتونات، علينا توخِّي الحذر في المنطق الذي نعتمد عليه بقدر أكبر مما نتوخاه مع الإلكترونات؛ فالأحداث المشوقة حقًّا هي التي تنتج عن تصادم الوحدات الثانوية. وتشتمل التصادمات على شحنات الوحدات الثانوية، وليس شحنات البروتونات. وبالرغم من أن الكواركات والجلوونات لا تساهم في شحنة البروتون الصافية، فإنها تلعب دورًا في تكوين هذه الشحنة. عندما تتصادم البروتونات، يمكن أن يصطدم أحد الكواركات الاتجاهية الثلاثة الموجودة في البروتون بكوارك اتجاهي آخَر، ولا تبلغ الشحنة الصافية في التصادم صفرًا، وعندما لا تتلاشى الشحنة الصافية للحدث، يمكن أن تقع أحيانًا أحداث مثيرة تتضمن المجموع الصحيح للشحنات، لكن التصادم لن يتمتع بالقدرات الهائلة التي تتمتع بها التصادمات التي يبلغ صافي شحنتها صفرًا.

لكن الكثير من التصادمات المثيرة للاهتمام ستحدث، بسبب البحر الافتراضي من الجسيمات الذي يسمح لأحد الكواركات بالالتقاء بكوارك مضاد، أو لجلوون بالتصادم مع جلوون آخَر؛ ما يؤدِّي إلى تصادمات لا تحمل أي شحنة صافية. وعندما ترتطم البروتونات معًا، يمكن لأحد الكواركات داخل بروتونٍ ما أن يرتطم بكوارك مضاد داخل بروتونٍ آخَر، وإن لم يكن ذلك ما يحدث في أغلب الأحيان. وجميع العمليات التي يمكن أن تحدث — بما في ذلك العمليات الناتجة عن تصادم الجسيمات — يكون لها دور عندما نتساءل عمَّا يحدث في مصادم الهادرونات الكبير، وتصبح هذه التصادمات الخاصة ببحر الجسيمات، في الواقع، أكثر احتمالًا مع تعجيل البروتونات إلى طاقات أعلى.

لا تحدِّد شحنة البروتون الإجمالية الجسيمات التي ستتكون؛ نظرًا لأن الجزء المتبقِّي من البروتون يواصل حركته، متجنِّبًا التصادم. والأجزاء التي لا تتصادم في

البروتون تحمل بقيةَ شحناتِ البروتون الصافية، ثم تتلاشى في أنبوب الحزم. كانت تلك الإجابة الدقيقة عن السؤال الذي طرحه عمدة مدينة بادوَا، وهو: إلى أين تذهب شحنات البروتونات أثناء تصادمها في مصادم الهادرونات الكبير؟ تتعلق هذه الإجابة بالطبيعة المركبة للبروتون والطاقة العالية التي تضمن تصادُم أصغر العناصر التي نعرفها على الإطلاق — أي الكواركات والجلوونات — فقط.

وبما أن أجزاء معينة فقط من البروتون هي التي تتصادم، وهذه الأجزاء يمكن أن تكون جسيمات افتراضية تتصادم بصافي شحنة يبلغ صفرًا، فإن الاختيار بين مصادم البروتونات والبروتونات وبين مصادم البروتونات والبروتونات المضادة ليس واضحًا تمامًا. بينما كان الأمر يستحق التضحية في الماضي باستخدام المصادمات المنخفضة الطاقة لإنتاج البروتونات المضادة، من أجل ضمان وقوع أحداث مثيرة للاهتمام، فإنه في ظل طاقات مصادم الهادرونات الكبير لا يُعَدُّ ذلك خيارًا واضحًا؛ فمع الطاقات العالية التي ينتجها هذا المصادم، يحمل بحر الكواركات والكواركات المضادة والجلوونات نسبةً كبيرة من طاقة البروتون.

لذا، وقع اختيار الفيزيائيين والمهندسين في تصميم مصادم الهادرونات الكبير على مصادمة حزمتَيْ بروتونات معًا، بدلًا من حزمة بروتونات وحزمة بروتونات مضادة.[4] يجعل ذلك من تحقيق درجة سطوع أكبر — أي توليد عدد أكبر من الأحداث — هدفًا سهل المنال، كما أن تكوين حُزَمِ البروتونات أيسر بكثير من تكوين حُزَمِ البروتونات المضادة.

وهكذا، فإن مصادم الهادرونات الكبير هو مصادم بروتونات، وليس بروتونات وبروتونات مضادة، ومع ما يجريه من تصادمات كثيرة — يسهل تنفيذها في ظل تصادم البروتونات معًا — يتمتع هذا المصادم بإمكانات هائلة.

الفصل السابع

حافة الكَوْن

استيقظت على مضض يوم ١ ديسمبر عام ٢٠٠٩ الساعة السادسة صباحًا بفندق ماريوت المجاور لمطار برشلونة كي ألحق بالطائرة التي كنتُ سأغادر على متنها ذلك اليوم. كنت في زيارة آنذاك لتلك المدينة من أجل حضور عرض أوبرالي صغير — كنتُ قد كتبتُ نصَّه — يُقدَّم للمرة الأولى في إسبانيا عن الفيزياء والاكتشاف. وقد كانت عطلة نهاية الأسبوع مُرضية للغاية، لكن الإرهاق تمكَّنَ مني، وشعرت بتوق شديد للعودة إلى دياري، لكن مفاجأة جميلة عطَّلتني قليلًا صبيحة ذلك اليوم.

كان العنوان الرئيسي للجريدة، التي التقطتها من أمام باب غرفتي بالفندق حينذاك، هو «مهشم الذرات يحطم رقمًا قياسيًّا جديدًا». بدلًا من العناوين الرئيسية المعتادة التي تتناول كارثةً مهولة أو قصةً مشوقة عابرة، كان الخبر الأهم ذلك اليوم هو وصول مصادِم الهادرونات الكبير إلى مستويات غير مسبوقة من الطاقة قبل ذلك التاريخ بيومين. ملأ المقالَ الحماسُ بشأن ذلك الإنجاز المهم لمصادم الهادرونات الكبير.

بعد ذلك اليوم ببضعة أسابيع، وعندما تحقَّق تصادم فعلي بين حزمتَيْ بروتونات عاليتَيِ الطاقة، حمل المقال الرئيسي بالصفحة الأولى لجريدة نيويورك تايمز عنوان «المصادِم يحقِّق رقمًا قياسيًّا، وأوروبا تلحق بركب الولايات المتحدة.»[1] وبذلك، لم يكن الرقم القياسي السابق الذي احتفت به الجريدة في برشلونة سوى حلقة أولى فحسب من حلقات سلسلة طويلة من الإنجازات المهمة التي حقَّقها مصادم الهادرونات الكبير في ذلك العقد.

وبذلك، يستكشف مصادم الهادرونات الكبير الآن مسافات أقصر من أي مسافات خضعت للدراسة من قبلُ. وفي الوقت ذاته، تعمل ملاحظات الأقمار الصناعية

والتليسكوبات على استكشاف أكبر النطاقات في النظام الكوني، وذلك بدارسة معدل سرعة تمدُّده وتفاصيل إشعاع الخلفية الميكروني الكوني الذي خلَّفه الانفجار العظيم.

لقد صرنا ندرك الآن الكثير من المعلومات عن تكوين الكَوْن، لكن كما هو الحال مع أغلب صور التقدم، طرح العديد من الأسئلة نفسه مع تزايد معرفتنا، وكشف بعضُه عن ثغرات خطيرة في الأُطُر النظرية لأعمالنا، لكننا ندرك في أحيان كثيرة طبيعة الحلقات المفقودة إدراكًا جيدًا يسمح لنا بمعرفة ما نحن بحاجة للبحث عنه وكيفية فعل ذلك.

لذا، دعونا نُلْقِ نظرةً عن كثب على ما يلوح لنا في الأفق؛ أي على التجارب التي في انتظارنا والنتائج المتوقَّعَة منها. يستعرض هذا الفصل بعضًا من الدراسات الفيزيائية والأسئلة الرئيسية التي سيتناولها باقي الكتاب.

تجاوُز النموذج القياسي في مصادِم الهادرونات الكبير

يوضِّح لنا النموذج القياسي لفيزياء الجسيمات كيفيةَ إجراء التنبؤات فيما يتعلَّق بالجسيمات الخفيفة التي تتكوَّن منها أجسامنا. أيضًا، يصف هذا النموذج جسيمات أخرى أثقل وزنًا تجري تفاعلات مشابِهة، هذه الجسيمات الثقيلة تتفاعل مع الضوء والنوى من خلال القوى ذاتها التي تتعرَّض لها الجسيمات التي تتكوَّن منها أجسامنا والنظام الشمسي.

إن الفيزيائيين على علم بطبيعة الإلكترون، والجسيمات الأثقل وزنًا ذات الشحنات المشابهة التي تُعرَف باسم «الميوون» و«التاوون». فنحن نعلم أن هذه الجسيمات — المعروفة باسم «اللبتونات» — تقترن بجسيمات متعادلة الشحنة (وهي جسيمات عديمة الشحنة لا تشهد تفاعلات كهرومغناطيسية مباشرة) تُسمَّى «النيوترينوات»، وهي لا تتفاعل إلا بواسطة القوة ذات الاسم المبتذل «القوة الضعيفة». والقوة الضعيفة مسئولة عن تحلُّل بيتا الإشعاعي إلى بروتونات (وتحلُّل بيتا للنوى بوجه عام)، وعن بعض العمليات النووية التي تحدث في الشمس، وجميع مواد النموذج القياسي تتعرَّض لتأثير القوة الضعيفة.

من ناحية أخرى، تتوفَّر لدينا معلومات أيضًا عن الكواركات الموجودة داخل البروتونات والنيوترونات، فتتعرض هذه الكواركات لكلٍّ من القوة الضعيفة والقوة الكهرومغناطيسية، إلى جانب القوة النووية القوية التي تحقِّق التماسُك بين الكواركات

كواركات

علوية | سفلية

u كوارك علوي | d كوارك سفلي

c كوارك ساحر | s كوارك غريب

t كوارك قمي | b كوارك قاعي

لبتونات

متعادلة الشحنة | مشحونة

υ_1 أخف نيوترينو | e إلكترون

υ_2 نيوترينو متوسط | μ ميوون

υ_3 أثقل نيوترينو | τ تاوون

بوزونات مقياسية: وسطاء الطاقة

H بوزون هيجز

g جلوونات

W^+ W^- بوزونات ضعيفة مشحونة

Z بوزون ضعيف متعادل

γ فوتون

القوة القوية

القوة الضعيفة

القوة الكهرومغناطيسية

شكل ٧-١: يعرض هذا الشكل عناصر النموذج القياسي لفيزياء الجسيمات التي تمثِّل معظم عناصر المادة الأساسية المعروفة، وتفاعلاتها. الكواركات العلوية والسفلية تستشعر القوى القوية والضعيفة والكهرومغناطيسية، أما اللبتونات المشحونة، فتستشعر القوتين الضعيفة والكهرومغناطيسية، في حين لا تستشعر النيوترينوات سوى القوة الضعيفة فحسب. تعمل الجلوونات، والبوزونات المقياسية الضعيفة، والفوتونات على نقل هذه القوى، أما بوزون هيجز، فلا يزال البحث عنه جاريًا.

الخفيفة داخل البروتونات والنيوترونات. وتفرض القوة القوية بعض المشكلات الحسابية، لكننا ندرك بنيتها الأساسية.

تشكِّل الكواركات واللبتونات، إلى جانب القوى القوية والضعيفة والكهرومغناطيسية، جوهرَ النموذج القياسي (انظر الشكل ٧-١ للاطلاع على ملخص

للنموذج القياسي لفيزياء الجسيمات). وبهذه المكونات، حقَّقَ الفيزيائيون النجاحَ في التنبؤ بنتائج جميع تجارب فيزياء الجسيمات حتى يومنا هذا، فنحن على وعي كامل بطبيعة جسيمات النموذج القياسي وكيفية عمل قواها.

لكن مع كل ذلك، لا تزال هناك بعض الألغاز المعقَّدَة التي لم تُحَلَّ بعدُ.

ويُعَدُّ دور الجاذبية في النموذج القياسي أحد أهم هذه المعضلات، وهي معضلة كبيرة أمام مصادِمِ الهادرونات الكبير فرصةٌ لحلها، لكنه أمر ليس مضمونًا على الإطلاق. فلا ريب أن طاقة هذا المصادم — رغم ارتفاعها مقارَنَةً بأي طاقة أخرى شهدها سطح الأرض من قبلُ، وبالطاقة التي سيتطلَّبها تناول بعض الألغاز المعقَّدَة الأخرى — أقل بكثير مما يمكننا من الإجابة عن الأسئلة المتعلقة بالجاذبية الكمية إجابات قاطعة؛ لذا، لفعل ذلك، علينا دراسة الأطوال المتناهية الصغر التي يمكن أن تظهر عندها آثار ميكانيكا الكم والجاذبية، الأمر الذي يتجاوز بكثير حدود ما يمكن لمصادم الهادرونات الكبير الوصول إليه. وإن حالفنا الحظ، ولعبت الجاذبية دورًا كبيرًا في معالجة مشكلات الجسيمات التي سنعتبرها قريبًا مرتبطة بالكتلة، فسنكون أقدر على الإجابة عن هذا السؤال، وقد يكشف مصادم الهادرونات الكبير عن معلومات مهمة بشأن الجاذبية والفضاء نفسه. وفي حال عدم حدوث ذلك، يكون لا يزال أمام الاختبارات التجريبية لأي نظرية كمية عن الجاذبية — بما في ذلك نظرية الأوتار — طريق طويل للغاية عليها أن تقطعه.

لكن علاقة الجاذبية بالقوى الأخرى ليست هي المعضلة الوحيدة الرئيسية التي لم تُحَلَّ إلى الآن؛ فثمَّةَ ثغرة أخرى خطيرة في فهمنا يهدف بلا شك مصادم الهادرونات الكبير لحلها، تتمثل هذه الثغرة في كيفية نشوء كُتَلِ الجسيمات الأساسية. قد يبدو ذلك تساؤلًا غريبًا للغاية (ما لم تكن، بالطبع، قد قرأتَ كتابي السابق)؛ وذلك لأننا ننزع للتفكير في كتلة أي جسيم كسمة جوهرية له غير قابلة للتغيير.

وهذا أمر صحيح إلى حدٍّ ما، فالكتلة إحدى السمات التي تُعرِّف الجسيم، إلى جانب الشحنة والتفاعلات. وطاقة الجسيمات لا يمكن أن تساوي صفرًا، أما الكتلة فهي سمة جوهرية يمكن أن يكون لها العديد من القيم، بما في ذلك الصفر. ومن الأمور المهمة التي أدركها أينشتاين إقراره بأن قيمة كتلة الجسيم توضِّح مقدار الطاقة التي يحملها عند سكونه، لكن الجسيمات لا يكون لكتلتها دومًا قيمة غير متلاشية، والجسيمات التي تبلغ كتلتها صفرًا، مثل الفوتون، لا تكون أبدًا في وضع السكون.

رغم ذلك، فإن الكتل غير الصفرية للجسيمات الأولية، والتي تمثِّل سمة جوهرية لهذه الجسيمات، تُعَدُّ لغزًا بالغ الغموض. فلا يقتصر الأمر على الكواركات واللبتونات فقط فيما يتعلق بالكتلة غير الصفرية، وإنما ينطبق ذلك أيضًا على البوزونات المقياسية الضعيفة، وهي الجسيمات التي تعمل على توصيل القوة الضعيفة. وقد قاس الفيزيائيون التجريبيون هذه الكتل، لكن القواعد الفيزيائية البسيطة لا تسمح بها، ولا تنطبق تنبؤات النموذج القياسي إلا إذا افترضنا أن الجسيمات تحمل هذه الكتل، لكننا لا نعلم مصدرها في الأساس؛ ومن ثمَّ فإن أبسط القواعد لا تنطبق هنا، وثمة شيء أكثر غموضًا يحدث.

يؤمن فيزيائيو الجسيمات بأن السبب الوحيد وراء ظهور هذه الكتل غير المتلاشية هو وقوع حدث جلل في مرحلة مبكرة من عمر الكَوْن، وهو عملية تشتهر باسم «آلية هيجز» نسبةً إلى الفيزيائي الاسكتلندي بيتر هيجز الذي كان من أوائل مَن أوضحوا كيفية تكوُّن الكتل. وجدير بالذكر هنا أن هناك ما لا يقل عن ستة علماء آخَرين طرحوا أفكارًا مشابهة، فيمكن أن تسمع كذلك عن آلية إنجليرت-بروت-هيجز-جورالنيك-هاجين-كيبل. لكنني سألتزم هنا باسم هيجز فقط.[2] تتمثَّل هذه الفكرة — أيًّا كان اسمها — في أن تحوُّلًا طوريًّا ما (ربما مثل التحول الطوري لفقاعات الماء السائل إلى بخار غازي) قد وقع وغيَّر طبيعة الكَوْن، فبعد أن كانت الجسيماتُ عديمةَ الكتلة وتتحرك بسرعة الضوء، صارت لها كتلة وصارت أبطأ في حركتها بعد هذا التحول الطوري الذي يتضمن ما يُعرَف بمجال هيجز. توضِّح آلية هيجز كيف أن الجسيمات الأولية تتحوَّل من الكتلة الصفرية في غياب مجال هيجز إلى الكتلة غير الصفرية التي توصلنا إليها في قياسات التجارب.

وفي حال كان الفيزيائيون مُحِقِّين، وكانت هناك آلية هيجز بالفعل في الكَوْن، فسوف يكشف مصادم الهادرونات الكبير عن دلالات تدحض التاريخ المعلوم للكَوْن. ويتمثَّل الدليل على هذه الآلية — في أبسط صور تطبيقها — في جسيم واحد؛ أَلَا وهو بوزون هيجز. وفي النظريات الفيزيائية الأكثر دقةً التي تطبِّق فكرة آلية هيجز، يمكن أن يصاحب بوزون هيجز جسيمات أخرى لها نفس الكتلة، أو يمكن أن يحل محله جسيم آخَر مختلف تمامًا.

وبغض النظر عن كيفية تطبيق آلية هيجز، فإننا نتوقَّع أن ينتج مصادِم الهادرونات الكبير شيئًا مثيرًا للاهتمام، قد يكون هذا الشيء هو بوزون هيجز، وقد يكون دليلًا على نظرية أكثر غرابة، مثل «النموذج الملون» الذي سنتناوله فيما بعدُ، وقد يكون شيئًا

غير متوقَّع على الإطلاق. وإذا جرت الأمور كما هو مخطط لها، فسيتوصل مصادم الهادرونات الكبير إلى الجسيم الذي فَعَّلَ آلية هيجز. وبصرف النظر عمَّا سيتوصل إليه، فسيوضح لنا أمرًا مثيرًا للاهتمام بشأن كيفية اكتساب الجسيمات لكتلتها.

إن النموذج القياسي لفيزياء الجسيمات، الذي يصف العناصر الأساسية للمادة وتفاعلاتها، نموذج ناجح. فقد تأكَّدَتْ تنبؤاته مرات عدة بدرجة عالية من الدقة. وبوزون هيجز هو الجزء الوحيد المتبقي في أحجية النموذج القياسي.[3] فنحن نفترض الآن أن الجسيمات لها كتل، لكننا عندما نفهم آلية هيجز، سنعلم كيف ظهرت هذه الكتل. وتلعب آلية هيجز، التي يستعرضها بقدر أكبر من التفصيل الفصلُ السادس عشر من هذا الكتاب، دورًا محوريًّا في فهم المادة على نحو أكثر دقةً.

ثمَّةَ لغز آخَر أكثر تعقيدًا في فيزياء الجسيمات من المتوقع أن يساعد مصادم الهادرونات الكبير في حله؛ فمن المرجح أن تلقي التجارب التي تُجرَى في هذا المصادم الضوء على حلٍّ للمسألة المعروفة باسم «مشكلة التسلسل الهرمي في فيزياء الجسيمات». فبينما تحاوِل آلية هيجز الإجابة عن السؤال «لماذا تمتلك الجسيمات الأولية كتلًا؟» تتناول مشكلة التسلسل الهرمي السؤال «لماذا تتسم هذه الكتل بما تتسم به من خصائص؟»

لا يعتقد فيزيائيو الجسيمات أن الكتل تنشأ بسبب ما يُسمَّى مجال هيجز الذي يتخلَّل الكون فحسب، وإنما يؤمنون كذلك بأنهم على علم بالطاقة التي حدث بها التحوُّل من الجسيمات العديمة الكتلة إلى الجسيمات ذات الكتلة، ويرجع ذلك إلى أن آلية هيجز تمنح بعض الجسيمات كتلًا على نحو يمكن التنبؤ به، ويعتمد فقط على قوة القوة النووية الضعيفة والطاقة التي يحدث في ظلِّها التحولُ.

الغريب في الأمر أن طاقة التحول تبدو غير منطقية على الإطلاق من الناحية النظرية، فإذا جمعنا بين ما نعرفه عن ميكانيكا الكم والنسبية الخاصة، فسيمكننا فعليًّا حساب المساهمات في كتل الجسيمات، والتي تكون أكبر بكثير مما يتم قياسه. فتوضح لنا الحسابات القائمة على ميكانيكا الكم والنسبية الخاصة أنه إذا لم تكن هناك نظرية أكثر عمقًا، فمن المفترض أن تكون الكتل أكبر بكثير، أكبر بنسبة ١٠ كوادريليون (١٠^١٦) مرة، مما هي عليه بالفعل، ولا تتماشى أجزاء هذه النظرية معًا إلا بذلك الهراء الذي لا يخجل الفيزيائيون من تسميته «الضبط الدقيق».

تفرض مشكلةُ التسلسل الهرمي في فيزياء الجسيمات أحدَ أكبر التحديات فيما يتعلق بالوصف الأساسي للمادة. فنحن نبغي معرفة الأسباب وراء التباين الهائل بين

حالة الكتل الفعلية وما كنَّا نتوقعه. فحسابات ميكانيكا الكم تدفعنا للاعتقاد بأن المادة من المفترض أن تكون أكبر من «نطاق الطاقة الضعيفة» الذي يحدِّد كتلتها، وعجزُنا عن فهم نطاق الطاقة الضعيفة في أبسط صور النموذج القياسي يمثِّل حجر عثرة أمام وضع نظرية متكاملة الأطراف.

والاحتمال المرجح هو أن تفترض نظريةٌ أكثرُ دقةً وإثارةً للاهتمام نموذجًا أكثر بساطة، وهو الاحتمال الذي يراه الفيزيائيون أكثر إقناعًا من نظرية الضبط الدقيق للطبيعة. ورغم ما يحدونا من طموحات بشأن اتساع نطاق النظريات التي يمكن أن تحل مشكلة التسلسل الهرمي، فمن المرجح أن يلقي مصادم الهادرونات الكبير الضوء على النظرية التي تفعل ذلك بالفعل. فلا توضِّح ميكانيكا الكم والنسبية المساهمات في الكتل فحسب، لكنها توضِّح كذلك الطاقة التي ينبغي أن تظهر عندها الظواهر الجديدة، وهذا هو نطاق الطاقة الذي يستكشفه مصادم الهادرونات الكبير.

يتوقَّع العلماء ظهور نظرية أكثر إثارةً للاهتمام في مصادم الهادرونات الكبير، وهذه النظرية التي ستتناول الأسرار المحيطة بالكتل، ينبغي أن تظهر مع ظهور تناظرات أو قوًى وجسيمات جديدة، وهي أحد الأسرار المهمة التي نطمح في أن تكشف التجاربُ بمصادم الهادرونات الكبير الستارَ عنها.

والحل في حد ذاته أمر مثير، لكنه سيدلنا على الأرجح إلى أفكار متعمقة بشأن جوانب أخرى للطبيعة، وأكثر الحلول المقترَحة إقناعًا لهذه المسألة تتضمن إما التوسُّع في تناظرات الزمان والمكان، أو مراجعة مفهومنا الحالي عن الفضاء.

توضِّح السيناريوهات التي يستعرضها الفصل السابع عشر بقدر أكبر من التفصيل أن المكان قد يتضمن ما هو أكثر من الأبعاد الثلاثة التي نعرفها: «الأعلى-الأسفل»، و«الأمام-الخلف»، و«اليمين-اليسار». على وجه التحديد، يمكن أن يتضمن المكان أبعادًا خفية تمامًا يمكننا من خلالها فهم خصائص الجسيمات وكتلها. وإن كان هذا هو الحال، فسيقدِّم مصادم الهادرونات الكبير الدلائلَ على هذه الأبعاد في صورة الجسيمات المعروفة باسم جسيمات «كالوزا-كلاين»، التي تنتقل عبر الزمكان الكامل ذي العدد الأكبر من الأبعاد.

أيًّا كانت النظرية التي ستقدِّم حلًّا لمشكلة التسلسل الهرمي، فمن المفترض أن تقدِّم أدلةً يمكن التوصُّل إليها تجريبيًّا في نطاق الطاقة الضعيفة، وسيربط المنطق النظري

بين ما نتوصل إليه في مصادم الهادرونات الكبير وما سيحل هذه المعضلة في النهاية، أيًّا ما كان. وقد يكون شيئًا توقَّعناه أو لم نتوقَّعه، لكنه سيكون مذهلًا في كلتا الحالتين.

المادة المظلمة

فضلًا عن القضايا المتعلقة بفيزياء الجسيمات الموضحة فيما سبق، يمكن أن يساعد مصادم الهادرونات الكبير كذلك في توضيح طبيعة «المادة المظلمة» الموجودة في الكَوْن، وهي المادة التي تُحدِث تأثيرًا جاذبًا، لكنها لا تمتص الضوء أو تشعُّه. فكل شيء نراه من حولنا — الأرض، الكرسي الذي تجلس عليه، الببغاء الصغير الذي تربيه — مكوَّن من جسيمات النموذج القياسي التي تتفاعل مع الضوء، لكن المادة المرئية التي تتفاعل مع الضوء ونستوعب تفاعلاتها لا تشكِّل سوى أربعة في المائة فقط من كثافة الطاقة في الكَوْن، ونحو ٢٣ في المائة من طاقة الكون يحملها ما يُسمَّى بالمادة المظلمة، وهي المادة التي لم يتم تعريفها بعدُ تعريفًا مؤكدًا.

المادة المظلمة هي بالتأكيد مادة، بمعنى أن أجزاءها تتماسك بفعل تأثير الجاذبية؛ ومن ثَمَّ فهي (إلى جانب المادة العادية) تساهِم في تكوين البِنى المختلفة، مثل المجرات. لكن على عكس المادة المألوفة التي تتشكل منها أجسامنا والنجوم في السماء، مثلًا، لا تشع هذه المادة ضوءًا ولا تمتصه؛ لذا تصعب رؤية المادة المظلمة؛ وذلك لأننا بوجه عام «نرى» الأشياء بواسطة الضوء الذي تشعه أو تمتصه.

في الحقيقة، مصطلح «المادة المظلمة» تسمية خاطئة؛ إذ إنها ليست مظلمة بالمعنى الحرفي للكلمة، فالمواد المظلمة تمتص الضوء، ويمكن رؤيتها بالفعل عند امتصاصها للضوء. أما المادة المظلمة، فهي لا تتفاعل مع أي شكل من أشكال الضوء على أي نحو يمكن ملاحظته، ومن الناحية العملية، المادة «المظلمة» شفافة، لكنني سأواصل استخدام المصطلح المتعارَف عليه، وأشير إلى هذه المادة المحيرة باسم المادة المظلمة.

نحن نعلم بوجود المادة المظلمة بسبب تأثيراتها الجاذبة، لكنْ دون رؤيتها مباشَرةً لن نعلم ماهيتها. فهل تتكون من عدد كبير من الجسيمات الدقيقة المتماثلة؟ وإن كان هذا هو الحال، فما كتلة هذه الجسيمات؟ وكيف تتفاعل؟

لعلنا سنتوصل قريبًا إلى مزيد من المعلومات في هذا الشأن. في الواقع، قد يتضمن مصادم الهادرونات الكبير القدر اللازم من الطاقة لتكوين الجسيمات التي يمكن أن تمثِّل المادة المظلمة. والمعيار الأساسي للمادة المظلمة هو أن الكَوْن يحتوي على القدر

الكافي منها لإحداث التأثيرات الجاذبة التي تم قياسها، ويعني ذلك أن «الكثافة الباقية» — وهي كمية الطاقة المُخزَّنة التي تشير النماذج الكونية إلى بقائها إلى يومنا هذا — ينبغي أن تتفق مع هذه القيمة التي تم قياسها. الحقيقة المدهشة هنا أنك إذا كان لديك جسيم مستقر تتوافق كتلته مع نطاق الطاقة الضعيفة الذي سيستكشفه مصادم الهادرونات الكبير (عن طريق معادلة ط = ك‌س٢)، والذي يتضمن تفاعلاته أيضًا جسيمات تحمل هذا النوع من الطاقة؛ فإن كثافته الباقية ستكون أقرب للمادة المظلمة.

ومن ثَمَّ، فإن مصادم الهادرونات الكبير لن يقدِّم لنا معلومات دقيقة فحسب عن المسائل التي تتناولها فيزياء الجسيمات، لكنه سيمنحنا كذلك دلائل على ما ينطوي عليه الكَوْن الآن، وكيف كانت بدايته، وهي الأسئلة التي يتضمَّنها علم الكونيَّات الذي يكشف لنا عن كيفية تطور الكَوْن.

وكما هو الحال مع الجسيمات الأولية وتفاعلاتها، يدرك العلماء قدرًا مذهلًا من الحقائق عن تاريخ الكَوْن، لكن كما هو الحال أيضًا مع فيزياء الجسيمات، لا تزال هناك بعض الأسئلة المهمة التي لم يتم التوصُّل إلى إجابات بشأنها بعدُ. ومن بين هذه الأسئلة الصعبة: ما المادة المظلمة؟ ما الكيان الأكثر غموضًا من المادة المظلمة والمُسمَّى «الطاقة المظلمة»؟ ما الذي تسبَّبَ في فترة التمدد المتسارع للكَوْن في مرحلة مبكرة من عمره، تلك الفترة المعروفة باسم «التضخم الكوني»؟

يشهد العصر الحالي ملاحظات مذهلة قد تفضي بنا إلى إجابات عن هذه الأسئلة، ودراسات المادة المظلمة تأتي في مقدمة الجوانب التي تتداخل فيها فيزياء الجسيمات مع علم الكونيَّات. وتفاعلات المادة المظلمة مع المادة المألوفة — أي المادة التي يمكننا استخدامها في تصنيع الكواشف — ضعيفة للغاية، بل ضعيفة لدرجة أننا لم نعثر بعدُ على أي دليل على المادة المظلمة خلا تأثيراتها الجاذبة.

ومن ثَمَّ، فإن الأبحاث الحالية تعتمد على تسليمنا بأن المادة المظلمة — رغم أنها تكاد تكون غير مرئية على الإطلاق — تتفاعل على نحو ضعيف (لكنه ليس مستحيلًا) مع المادة التي نعرفها. وذلك ليس مجرد تخمين نرغب في تصديقه، وإنما هو استنتاج قائم على العملية الحسابية المذكورة أعلاه، والتي توضِّح أن الجسيمات المستقرة التي ترتبط تفاعلاتها بنطاق الطاقة الذي سيستكشفه مصادم الهادرونات الكبير، تتسم بالقدر الصحيح من الكثافة اللازمة لأن تكون مادة مظلمة. ورغم عدم تعرُّفنا على المادة المظلمة بعدُ، تحدونا الآمال في أن تسنح لنا الفرصة لاستكشافها في المستقبل القريب.

لكن أغلب تجارب علم الكونيَّات لا تُجرَى في المعجِّلات، وإنما التجارب المخصصة الموجهة للخارج وتُجرَى على سطح الأرض وفي الفضاء، هي المسئولة مسئولية أساسية عن فهمنا للحلول الممكنة للقضايا الكونية وتطوُّر هذا الفهم.

على سبيل المثال، أرسل الفيزيائيون الفلكيون أقمارًا صناعية إلى الفضاء لرصد الكَوْن من بيئة لا تحجبها الأتربة والعمليات الكيميائية والفيزيائية الموجودة على سطح الأرض أو بالقرب منه، وتعمل التليسكوبات والتجارب التي تُجرَى هنا على سطح الأرض على منحنا المزيد من المعلومات الدقيقة في إطار بيئة يمكن للعلماء التحكُّم فيها مباشَرَةً، وتهدف التجارب التي تُجرَى في الفضاء أو على سطح الأرض إلى إلقاء الضوء على العديد من الجوانب المتعلقة بكيفية نشوء الكَوْن.

ونحن نطمح في أن تمكِّنَنا أَيَّةُ إشارة قوية بما فيه الكفاية نجدها في أيٍّ من هذه التجارب (التي سنستعرضها في الفصل الحادي والعشرين) من كشف أسرار المادة المظلمة؛ فيمكن أن توضِّح لنا هذه التجارب طبيعة المادة المظلمة، إلى جانب الكشف عن تفاعلاتها وكتلتها. وإلى أن يتحقَّق ذلك، يقدح المُنَظِّرون زناد فكرهم بشأن جميع النماذج المحتملة للمادة المظلمة، وكيفية استخدام جميع هذه الاستراتيجيات الاستكشافية لمعرفة الماهية الحقيقية للمادة المظلمة.

الطاقة المظلمة

لا يساوي حاصل جمع المادة المألوفة والمادة المظلمة إجمالي الطاقة الموجودة في الكَوْن؛ فهما لا يشكِّلان معًا سوى ٢٧ في المائة فقط من هذه الطاقة الإجمالية. وما يفوق المادة المظلمة غموضًا هو ما يشكِّل النسبة المتبقية من طاقة الكون (٧٣ في المائة)، ونعني بهذا الطاقةَ المعروفةَ الآن باسم الطاقة المظلمة.

يُعَدُّ اكتشافُ الطاقة المظلمة الاكتشافَ الأهم في تصحيح مسار الفيزياء في نهاية القرن العشرين. ورغم أننا ما زلنا نجهل الكثير عن نشأة الكون، فقد نجحنا في تحقيق فهم مذهل لهذه النشأة بناءً على ما يُعرَف بنظرية الانفجار العظيم، وأتم هذا الفهم فترة التمدد المتسارع للكون المعروفة باسم التضخم الكوني.

وقد توافَقَتْ هذه النظرية مع عدد من الملاحظات، مثل ملاحظات الإشعاع الميكروني في السماء، وهو إشعاع الخلفية الميكروني الكوني المتخلف عن الانفجار العظيم. في الأصل، كان الكون عبارة عن كرة نارية كثيفة حارة، لكن في خلال ١٣٫٧٥ مليار عام من وجوده،

خفَّ وزن هذه الكرة النارية وبردت للغاية، مخلفةً هذا الإشعاع الأكثر برودةً الذي لا تتجاوز درجة حرارته ٢٫٧ كلفن حاليًّا؛ أي أعلى ببضع درجات مئوية عن الصفر المطلق. وتظهر بعض الأدلة الأخرى على صحة نظرية الانفجار العظيم في الدراسات الدقيقة للمجموعات الوفيرة من النوى التي نتجت عن النشأة المبكرة للكون، وفي قياسات تمدُّد الكون ذاته.

والمعادلات الأساسية التي نستخدمها للتوصُّل إلى كيفية نشأة الكون، هي المعادلات التي وضعها أينشتاين في مطلع القرن العشرين وتوضِّح لنا كيفية اشتقاق مجال الجاذبية من توزيع معين للمادة أو الطاقة. تنطبق هذه المعادلات على مجال الجاذبية بين الأرض والشمس، وتنطبق في الوقت نفسه أيضًا على الكون ككل، وفي جميع الأحوال، لكي نتوصل إلى نتائج هذه المعادلات، علينا معرفة المادة والطاقة اللتين تحيطان بنا.

لكن الملاحظة الصادمة كانت أن عمليات قياس خصائص الكون تطلَّبَتْ وجود نوع جديد من الطاقة لا تحمله المادة، هذه الطاقة لا تحملها الجسيمات أو أي مواد أخرى، ولا يتماسك بعضها ببعض مثل المادة العادية. لا تقل كثافة هذه الطاقة مع تمدُّد الكون، بل تحافظ على ثبات كثافتها. يتسارع تمدُّد الكون ببطء نتيجةً لهذه الطاقة الغامضة التي توجد في جميع أنحائه، حتى إن خَلَتْ هذه الأنحاء من المادة.

كان أينشتاين أول مَن اقترح هذا النوع من الطاقة من خلال ما أسماه «الثابت الكوني»، لكنه بعد فترة قصيرة، اعتقد أنه قد أخطأ. وهذا ما حدث بالفعل، فقد جانَبَه الصوابُ عندما استخدم هذا «الثابت الكوني» في تفسير سبب ثبات الكون؛ فالكون يتمدَّدُ بالفعل، وهذا ما أوضحه إدوين هابل بعد فترة قصيرة من طرح أينشتاين لهذه الفكرة، وهذا التمدُّد ليس حقيقيًّا فحسب، لكن يبدو الآن أن ما يشهده حاليًّا من تسارُع يحدث نتيجةَ ذلك النوع الغريب من الطاقة الذي أشار إليه أينشتاين وتراجَعَ عنه سريعًا في ثلاثينيات القرن العشرين.

يرغب العلماء في التوصُّل إلى فهمٍ أفضلَ لهذه الطاقة المظلمة الغامضة، والملاحظات الآن تهدف لتحديد ما إذا كانت هذه الطاقة هي طاقة الخلفية التي اقترحها أينشتاين للمرة الأولى، أم إنها نوع جديد من الطاقة يتغيَّر مع الوقت، أم إنها أمر غير متوقَّع على الإطلاق لم نعرف حتى كيف نفكِّر فيه من قبلُ.

الأبحاث الأخرى في علم الكونيات

ما سبق إيضاحه ليس سوى عينة فقط — وإن كانت عينة مهمة — لما نُجرِيه حاليًّا من أبحاث. فإلى جانب ما استعرضته فيما سبق، يُجرَى العديد من الأبحاث الأخرى في مجال علم الكونيات، فمن المنتظر أن تدرس كواشف موجات الجاذبية الأشعة الجاذبة الصادرة عن الثقوب السوداء الناشئة، وغيرها من الظواهر المثيرة الأخرى التي تنطوي على قدر هائل من الطاقة والكتلة، ومن المنتظر أيضًا أن توضِّح لنا التجارب على الموجات الميكرونية الكونية مزيدًا من المعلومات عن التضخُّم الكوني، وأن تكشف الأبحاث حول الأشعة الكونية عن تفاصيل جديدة بشأن محتوى الكون. هذا إلى جانب ما يمكن أن تتوصل إليه كواشف الأشعة تحت الحمراء من أجسام غريبة جديدة في السماء.

في بعض الحالات، سنصل إلى فهم جيد للملاحظات يمكننا من معرفة ما تعنيه هذه الملاحظات فيما يتعلق بطبيعة المادة الأساسية والقوانين الفيزيائية، وفي أحيان أخرى، سنستغرق وقتًا طويلًا في كشف الستار عن هذه المعاني الضمنية. وبغض النظر عما سيحدث، سيؤدي بنا التوفيق بين النظرية والبيانات إلى تفسيرات أرقى للكون من حولنا، وسيصل بمعرفتنا إلى آفاق غير مسبوقة.

لعل بعض التجارب ستتوصل إلى نتائج قريبًا، في حين قد تستغرق تجارب أخرى سنوات عدة لتحقيق ذلك، ومع ظهور بيانات جديدة، سيضطر العلماء إلى إعادة النظر في التفسيرات المقترحة — بل التخلي عنها تمامًا أحيانًا — كي يتمكَّنوا من تطوير ما يضعونه من نظريات وتطبيقها تطبيقًا صحيحًا. قد يبدو ذلك مثبطًا للهمم، لكنه في الحقيقة ليس على هذا القدر من السوء؛ فنحن نتوقَّع في شغف التوصُّل إلى أدلة من شأنها مساعدتنا في الإجابة عما نطرحه من أسئلة، بينما توجهنا نتائج التجارب في أبحاثنا وتضمن لنا تحقيق التقدم، حتى عندما تتطلب النتائج الجديدة طرح الأفكار القديمة جانبًا. تقوم فرضياتنا في البداية على الاتساق والجمال النظري، لكن التجربة — وليس الاعتقاد الراسخ — هي ما تحدِّد في النهاية ما هو صحيح، وهذا ما يتضح على مدار هذا الكتاب.

الجزء الثالث

الماكينات، والقياسات، والاحتمالية

الفصل الثامن

الحلقة الحاكمة

لستُ ممَّن يميلون للمبالغة؛ إذ أرى عادةً أن الإنجازات أو الأحداث العظيمة تتحدث دومًا عن نفسها. هذا النفور من تنميق الحديث يوقعني دومًا في مشكلات في أمريكا؛ حيث يفرط الناس في استخدام صيغ المبالغة إلى الحد الذي أصبح المدح، الذي لا يتضمن أيًّا من هذه الصيغ، يُساء تفسيره أحيانًا ويُعَدُّ إساءة. يشجعني الآخَرون كثيرًا على إضافة بعض الصفات أو الكلمات الطنَّانة إلى عبارات الدعم التي أتحدَّث بها لتجنُّب أيِّ نوع من سوء الفهم، لكن في حالة مصادم الهادرونات الكبير، سأتبع نهجًا مغايرًا لما اعتدته، وأقول إن هذا المصادم هو لا ريب إنجازٌ مدهشٌ يتميز بهيبة وجمال مذهلين؛ إنه التكنولوجيا في صورتها المبهرة.

في هذا الفصل، سنشرع في استكشافنا لهذه الماكينة المذهلة، وفي الفصل الذي يليه، سنستعرض المغامرة المثيرة لبناء هذا الصرح، وبعده ببضعة فصول، سندخل إلى عالم التجارب التي تسجِّل ما يتوصَّل إليه مصادم الهادرونات الكبير من نتائج. لكننا الآنَ سنركِّز على الماكينة ذاتها التي تعمل على عزل البروتونات العالية الطاقة — التي نطمح في أن تكشف عن عوالم داخلية جديدة — وتعجيلها ومصادمتها.

مصادم الهادرونات الكبير

عند زيارتي لمصادم الهادرونات الكبير للمرة الأولى، أذهلتني تلك الهيبة التي يُحدِثها هذا المكان في النفس، رغم أنه سبقت لي زيارة كواشف ومصادمات جسيمات عدة مرات في السابق، لكن حجم هذا المصادم يختلف عن كل ما رأته عيناي من قبلُ. دخلنا المكان، ووضعنا الخوذات على رءوسنا، سرنا إلى الداخل عبر نفق المصادم، وتوقَّفنا عند الحفرة

الضخمة التي سيُنزَل فيها كاشف أطلس (الكاشف الحلقي بمصادم الهادرونات الكبير)، وأخيرًا وصلنا إلى الجهاز التجريبي نفسه. كان لا يزال تحت الإنشاء، ما يعني أن كاشف أطلس لم يكن قد تمت تغطيته بعدُ كما هو الحال عند تشغيل الجهاز، وكان مكشوفًا تمامًا للعيان.

وبالرغم من أن العالِمة بداخلي أحجمت في البداية عن النظر إلى هذه المعجزة التكنولوجية الدقيقة دقةً مذهلة، على أنها عمل فني — بل عمل فني بارز أيضًا — فلم أستطع منع نفسي من إخراج الكاميرا والتقاط الصور له. كم يصعب التعبير بالكلمات عمَّا رأيته من تعقيد وتماسك وضخامة وتداخل في الألوان والخطوط! تأثير مذهل لا يسعك سوى أن تقف أمامه متسمرًا!

وقد كان لرجال الفن ردود أفعال مشابهة عند رؤيتهم لهذا الصرح؛ فعندما تجوَّلَتْ هاوية جمع الأعمال الفنية فرانشيسكا فون هابسبورج في هذا المصادم، اصطحبت معها مصورًا محترفًا ليلتقط صورًا بلغت من الجمال ما جعلها تُنشَر في مجلة «فانيتي فير». وعندما زار المخرج السينمائي جيسي ديلان — الذي يتميَّز بنشأته الثقافية — مصادم الهادرونات الكبير للمرة الأولى، نظر إليه كعمل فني متميز، و«إنجاز بلغ ذروته». ودفع هذا الجمال ديلان إلى الرغبة في مشاركته مع الآخَرين، فسجَّلَ مقطع فيديو للتعبير عن انبهاره بجلال تلك الماكينة وما يُجرَى فيها من تجارب.

أما الممثل المناصر للعلم، آلان ألدا، عند إدارته للجنة مناقشة تناولَتْ موضوعَ مصادِمِ الهادرونات الكبير، فقد شبَّه هذا المصادم بإحدى عجائب الدنيا القديمة. والفيزيائي، ديفيد جروس، شبَّهَه في عظمته بالأهرامات. أما المهندس ورائد الأعمال إيلون ماسك — المشارك في تأسيس موقع «باي بال» الإلكتروني، ومدير شركة «تِسلا» لصناعة السيارات الكهربائية، ومؤسس شركة «سبيس إكس» لصناعة الصواريخ التي ستنقل الماكينات والمنتجات إلى المحطة الفضائية الدولية، ومديرها — فقال عن هذا المصادم: «إنه بلا شك أحد أعظم إنجازات البشرية على الإطلاق.»

سبق لي سماع مثل هذه العبارات في جميع مناحي الحياة. ويُعَدُّ كلٌّ من الإنترنت، والسيارات السريعة، والطاقة الصديقة للبيئة، والسفر إلى الفضاء، من بين أكثر الجوانب إثارةً وفعاليةً في مجال الأبحاث التطبيقية حاليًّا، لكن محاولة فهم القوانين الأساسية للكَوْن أمر مذهل ومثير في حد ذاته، فيتشابه محِبُّو الفنون والعلماء في رغبتهم في فهم العالم وكشف الستار عن أصوله، وقد يجادل البعض بشأن طبيعة أعظم إنجازات

البشرية على الإطلاق، لكنني لا أظن أنه يمكن لأحد التشكيك في أن أحد أعظم الأمور التي نقوم بها على الإطلاق هي التأمل فيما يكمن وراء ما هو في متناولنا ودراسته، والبشر وحدهم هم الذين يحملون على عاتقهم مهمة خوض هذا التحدي.

إن التصادمات التي سندرسها في مصادم الهادرونات الكبير تتشابه مع التصادمات التي حدثت في أول جزء من التريليون من المِلِّي ثانية بعد الانفجار العظيم، وسوف تقدِّم لنا هذه التصادمات معلومات عن المسافات الصغيرة، وطبيعة المادة، والقوى التي كانت موجودة في تلك المرحلة المبكرة من عمر الكَوْن؛ فيمكنك أن تعتبر مصادم الهادرونات الكبير مجهرًا فائقًا يسمح لنا بدراسة الجسيمات والقوى عند مسافات غاية في الصغر، يبلغ حجمها عُشْر الألف من التريليون من المِلِّيمتر.

يحقِّق مصادم الهادرونات الكبير هذه العمليات من السبر الدقيق عن طريق إحداث تصادمات بين الجسيمات بطاقة تفوق أي طاقة تمَّ التوصُّلُ إليها من قبلُ على سطح الأرض؛ إذ تبلغ طاقته سبعة أضعاف طاقةِ أقوى المصادماتِ الموجودة حاليًّا، وهو المصادم تيفاترون في باتافيا بولاية إلينوي. ومثلما أوضحنا في الفصل السادس، توضِّح لنا ميكانيكا الكم واستخدامها للموجات أن هذه الطاقات ضرورية لإجراء الدراسات على مثل هذه المسافات الصغيرة. وفضلًا عن الارتفاع في الطاقة، ستكون الكثافة بالمصادم أعلى من الكثافة بمصادم تيفاترون خمسين مرة، ما يزيد من احتمال اكتشاف الأحداث النادرة التي قد تكشف عن أسرار الطبيعة.

رغم اعتراضي على المغالاة في الحديث، فإن مصادم الهادرونات الكبير ينتمي لعالم لا يمكن وصفه إلا بصيغ المبالغة؛ فهو ليس كبيرًا فحسب، وإنما هو أكبر ماكينة شُيِّدت على الإطلاق. وهو ليس باردًا فحسب، وإنما درجة الحرارة البالغة ١٫٩ كلفن (١٫٩ درجة مئوية فوق الصفر المطلق) واللازمة لعمل مغناطيسات مصادم الهادرونات الكبير الفائقة التوصيل، هي أبرد منطقة ممتدة عرفها الإنسان في الكون، بل إنها أبرد من الفضاء ذاته. والمجال المغناطيسي في المصادم ليس كبيرًا فحسب، وإنما المغناطيسات الثنائية القطب الفائقة التوصيل — التي تنتج مجالًا مغناطيسيًّا تفوق قوته المجال المغناطيسي للأرض بما يزيد عن ١٠٠ ألف مرة — هي أقوى المغناطيسات المُصنَّعة على الإطلاق.

لا تنتهي الحدود القصوى لهذا المصادم عند هذا الحد؛ فالفراغ داخل الأنابيب المحتوية على البروتونات، الذي يساوي عشرة من التريليون من الغلاف الجوي، هو أكثر

الفراغات اكتمالًا على نطاق أكبر المسافات التي تَمَّ إنتاجها على الإطلاق. والطاقة الناتجة عن التصادمات هي أعلى الطاقات التي تَمَّ التوصُّلُ إليها على سطح الأرض على الإطلاق، وهو ما يسمح لنا بدراسة التفاعلات التي حدثَتْ في المراحل المبكرة من عمر الكَوْن.

يختزن مصادم الهادرونات الكبير كذلك كميات ضخمة من الطاقة، والمجال المغناطيسي نفسه يختزن كميةً من الطاقة تعادِل طُنَّين من مادة تي إن تي، في حين تختزن الأشعة نحو عُشْر هذه الكمية، وتُخزَّن الطاقة في واحد من المليار من الجرام من المادة، وهو ما يمثِّل جزءًا بالغَ الصِّغَر من المادة في ظلِّ الظروف العادية. وعند انتهاء الماكينة من العمل على الإشعاع، يتم التخلُّص من هذه الطاقة الشديدة التركيز في أسطوانة مصنوعة من مركب الجرافيت يبلغ طولها ثمانية أمتار وقطرها مترًا واحدًا، وتكسوها طبقة من الأسمنت وزنها ألف طن.

إن الحدود القصوى التي انطوى عليها مصادم الهادرونات الكبير بلغت بالتكنولوجيا مداها، وقد تحقق ذلك بثمن باهظ للغاية يدفعنا لاستخدام صيغ المبالغة هنا أيضًا؛ فسعر المصادم البالغ ٩ مليارات دولار أمريكي يجعل منه أغلى ماكينة صُمِّمت على الإطلاق، وقد دفعت سيرن ثلثَيْ هذه التكلفة، بمساهمة الدول الأعضاء بالمنظمة البالغ عددها عشرين دولة في ميزانية المنظمة، كلٌّ وفق إمكاناته، وتتراوح نسبة المساهمة من ٢٠ في المائة من ألمانيا إلى ٠٫٢ في المائة من بلغاريا. أما باقي التكلفة، فدفعتها الدول غير الأعضاء، والتي تضمَّنَتِ الولايات المتحدة، واليابان، وكندا. وتساهم سيرن بنسبة ٢٠ في المائة في التجارب نفسها التي تموِّلها صور التعاون الدولية. وبدءًا من عام ٢٠٠٨ الذي شُيِّدت فيه الماكينة، عمل أكثر من ١٠٠٠ عالم أمريكي في تجربتَيِ اللولب المركب للميوونات وأطلس، وساهمت الولايات المتحدة أيضًا بمبلغ ٥٣١ مليونَ دولارٍ في مشروع مصادم الهادرونات الكبير.

بداية مصادم الهادرونات الكبير

منظمة سيرن، التي تضم مصادم الهادرونات الكبير، هي منشأة بحثية تجمع بين العديد من البرامج التي تعمل على نحوٍ متزامنٍ، لكن موارد هذه المنظمة تتركز بوجه عام في برنامج رئيسي واحد. في ثمانينيات القرن العشرين، كان هذا البرنامج هو مصادم «إس بارب إس»،[1] الذي توصَّلَ إلى حاملات القوة الضرورية للنموذج القياسي في فيزياء الجسيمات، وقد اكتشفت التجارب المتميزة، التي أُجرِيت في هذا المصادم في عام ١٩٨٣،

البوزونات المقياسية الضعيفة — بوزوني W المشحونين، وبوزون Z المتعادل — وهي البوزونات التي تعمل على نقل القوة الضعيفة. كانت هذه البوزونات المكونات الأساسية للنموذج القياسي غير المتوفرة آنذاك، وكان لاكتشافها الفَضْل في حصول قادة مشروع المعجِّل على جائزة نوبل.

لكن بينما كان مصادم «إس بارب إس» قيد التشغيل، كان العلماء والمهندسون يخطِّطون بالفعل لإنشاء ما يُعرَف باسم مصادم الإلكترونات-البوزيترونات الكبير، والذي كان المزمع أن يُحدِث تصادمات بين الإلكترونات والجسيمات المضادة لها المعروفة باسم البوزيترونات بهدف دراسة التفاعلات الضعيفة والنموذج القياسي بتفصيل متقن. وتحقَّقَ هذا الحلم بالفعل في تسعينيات القرن العشرين، عندما درس ذلك المصادم ملايين البوزونات المقياسية الضعيفة عن طريق إجراء قياسات دقيقة للغاية، وهي البوزونات التي قدَّمَتْ للعلماء معرفةً كبيرةً عن تفاعلات فيزياء النموذج القياسي.

كان مصادم الإلكترونات-البوزيترونات الكبير مصادمًا حلقيًّا يبلغ محيطه ٢٧ كيلومترًا، وكانت الإلكترونات والبوزيترونات تُدفَع على نحو متكرِّر في هذه الحلقة أثناء دورانها. ومثلما رأينا في الفصل السادس، المصادمات الحلقية قد تفتقر إلى الكفاءة عند تعجيل الجسيمات الخفيفة، مثل الإلكترونات؛ لأن هذه الجسيمات تبعث إشعاعات عند تعجيلها في مسار حلقي؛ ومن ثَمَّ كانت حُزَم الإلكترونات في ظل طاقة مصادم الإلكترونات-البوزيترونات الكبير — التي بلغت نحو ١٠٠ جيجا إلكترون فولت — تفقد نحو ثلاثة في المائة من طاقتها في كل مرة كانت تدور فيها. لم تكن تلك بالخسارة الكبيرة، لكننا إذا أردنا تعجيل الإلكترونات في هذا النفق بطاقة أعلى، فستَحُول خسارة الطاقة مع كل دورة دون تحقيق هذا الغرض. وزيادة الطاقة بمقدار عشرة أضعاف كان من شأنها زيادة خسارة الطاقة بمقدار عشرة آلاف ضعف، الأمر الذي كان سيُفقِد المعجِّل كفاءته على نحو غير مقبول.

لهذا السبب، بينما كانت تُوضَع التصورات لمصادم الإلكترونات-البوزيترونات الكبير، بدأ التفكير بالفعل في المشروع الرئيسي الجديد للمنظمة الأوروبية للأبحاث النووية، والذي كان من المفترض أن يعمل بمستوًى أعلى من الطاقة. ونظرًا لخسائر الطاقة غير المقبولة للإلكترونات، تعيَّنَ على المنظمة — إذا أرادَتْ تشييد ماكينة ذات مستوًى أعلى من الطاقة — استخدامُ حُزَمٍ من البروتونات، وهي حُزَم أثقل وزنًا وأقل إصدارًا للأشعة. وقد كان الفيزيائيون والمهندسون الذين شيَّدوا نفق مصادم



شكل ٨-١: يوضِّح هذا الشكل محيط مصادم الهادرونات الكبير. والخط الأبيض يشير إلى النفق الموجود تحت الأرض، بينما تظهر الجبال وبحيرة جنيف في الخلفية (الصورة مُقدَّمة من سيرن).

الإلكترونات-البوزيترونات الكبير على وعي بهذه الاحتمالية المرغوب فيها؛ لذلك شيَّدوا نفق هذا المصادم ليتَّسِع بما فيه الكفاية لاحتواء مصادم بروتونات محتمل في المستقبل، وذلك بعد تفكيك مصادم الإلكترونات-البوزيترونات.

وأخيرًا، وبعد ٢٥ عامًا، صارت حُزَم البروتونات تُعجَّل الآن داخل النفق الذي حُفِر في الأساس لمصادم الإلكترونات-البوزيترونات الكبير (انظر الشكل ٨-١). انتهى تشييد مصادم الهادرونات الكبير بعد بضعة أعوام من التاريخ المحدَّد له، وزادت تكلفته عن الميزانية المحدَّدة له بنسبة ٢٠ في المائة. وهذا أمر مؤسف، لكنه ليس فادحًا مع الوضع

في الاعتبار أن مصادم الهادرونات الكبير هو أكبر التجارب التي صُمِّمَتْ على الإطلاق، وأعلاها شأنًا من ناحية المشاركة الدولية والتكلفة والطاقة والآمال المعقودة عليه. وقد قال كاتب السيناريوهات والمخرج جيمس لورانس بروكس مازحًا عند سماعه عن العقبات التي تعرَّضَ لها هذ المصادم وتجاوزه إياها: «أعرف أناسًا استغرقوا القدر نفسه تقريبًا من الوقت لاختيار ورق الحائط المناسب لهم. ولعل فهم الكون أهم بعض الشيء من ذلك، فثمة أمور مذهلة عديدة في انتظار اكتشافنا لها.»

تتابُع الحلقات

البروتونات موجودة حولنا في كل مكان، وهي موجودة أيضًا داخل أجسامنا، لكنها ترتبط — بوجه عام — بالنوى المحاطة بالإلكترونات داخل الذرات. وهي لا تنعزل عن هذه الإلكترونات، ولا تصطفُّ (في خطوط متوازية) داخل الحُزَم؛ ومن ثَمَّ يعمل مصادِم الهادرونات الكبير على فصل هذه البروتونات وتعجيلها أولًا، ثم دَفْعها إلى وجهتها النهائية، وأثناء ذلك تستغل هذه البروتونات ما يتميَّز به ذلك المصادم من حدود قصوى.

والخطوة الأولى في إعداد حُزَم البروتونات هي تسخين ذرات الهيدروجين بحيث تُنزَع الإلكترونات منها وتُترَك البروتونات المعزولة التي تمثِّل نوى هذه الذرات، وتعمل المجالات المغناطيسية على حشد هذه البروتونات في حُزَم، وبعد ذلك يعجِّل المصادم هذه الحزم في مراحل مختلفة بمناطق متباينة، مع انتقال البروتونات من معجِّل إلى آخَر؛ ما يزيد من طاقتها في كل مرة قبل تحوُّلها من إحدى الحزمتين المتوازيتين كي تتمكَّنَا من التصادم.

تحدث مرحلة التعجيل الأولية في معجِّل الجسيمات الخطي بسيرن، وهو عبارة عن امتداد خطي لنفق تُعجَّل فيه البروتونات بفعل الموجات اللاسلكية، وعند وصول الموجة اللاسلكية إلى ذروتها، يعمل المجال الكهربي لها على تعجيل البروتونات التي تنجرف بعد ذلك بعيدًا عن هذا المجال حتى لا تقل سرعتها مع ضعف المجال. ومن ثم تعود إليه عند وصوله إلى ذروته مجدَّدًا، وبذلك تعجل من ذروة إلى أخرى. وهكذا، فإن الموجات اللاسلكية تعمل على تعجيل البروتونات مثلما تدفع طفلك على الأرجوحة؛ فتدفع الموجات البروتونات، معزِّزة من طاقتها، لكن بقدر ضئيل فقط في هذه المرحلة الأولية من التعجيل.

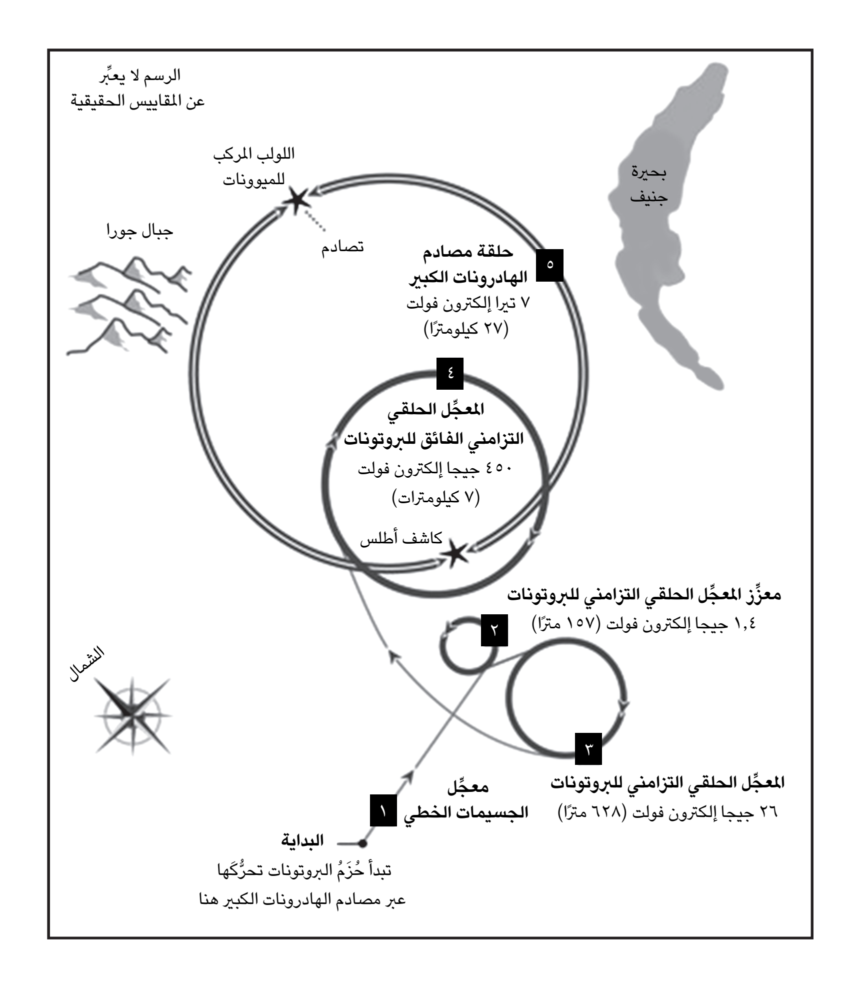
في المرحلة التالية، تدفع المغناطيسات البروتونات إلى داخل سلسلة من الحلقات؛ حيث تخضع لمزيد من التعجيل، وكلٌّ من هذه المعجِّلات يعمل مثل المعجِّل الخطي الموضَّح فيما سبق. لكن نظرًا لأن هذه المعجِّلات التالية تتَّخِذ شكل حلقات، يمكنها رفع طاقة البروتونات على نحو متكرِّر أثناء دورانها آلاف المرات؛ ومن ثَمَّ تنقل هذه المعجِّلات الحلقية قدرًا هائلًا من الطاقة.

هذا «التتابع من الحلقات»، الذي يعجِّل البروتونات قبل دخولها الحلقة الكبيرة لمصادم الهادرونات الكبير، يتكوَّن من «معزِّز المعجِّل الحلقي التزامني للبروتونات» الذي يزيد من سرعة البروتونات لتصل إلى ١٫٤ جيجا إلكترون فولت، و«المعجِّل الحلقي التزامني للبروتونات» الذي يزيد من سرعتها لتصل إلى ٢٦ جيجا إلكترون فولت، ثم «المعجِّل الحلقي التزامني الفائق للبروتونات» الذي يزيد من طاقتها لتصل إلى ما يُعرَف بطاقة الحَقْن، والتي تساوي ٤٥٠ جيجا إلكترون فولت (انظر الشكل ٨-٢ لمشاهدة رحلة البروتون). وهذه هي الطاقة التي تحملها البروتونات عند دخولها مرحلة التعجيل الأخيرة في النفق الضخم البالغ طوله ٢٧ كيلومترًا.

ويعود أصل بعض حلقات التعجيل السابق ذكرها إلى مشروعات سابقة بسيرن؛ فقد احتفل أقدم هذه المعجِّلات، وهو المعجِّل الحلقي التزامني للبروتونات، بيوبيله الذهبي في نوفمبر ٢٠٠٩، ولعب كذلك معزِّز المعجِّل الحلقي التزامني للبروتونات دورًا مهمًّا في عمل آخِر المشروعات الرئيسية للمنظمة، وهو مصادم الإلكترونات-البوزيترونات الكبير، في ثمانينيات القرن العشرين.

وبعد أن تغادِر البروتونات المعجِّل الحلقي التزامني الفائق للبروتونات، تبدأ مرحلة الحقن الطويلة البالغة مدتها ٢٠ دقيقة. وفي هذه المرحلة، تُدفَع البروتونات الناتجة عن هذا المعجِّل الفائق، التي تبلغ طاقتها ٤٥٠ جيجا إلكترون فولت، إلى داخل النفق الضخم لمصادم الهادرونات الكبير. وفي هذا النفق، تتحرك البروتونات في حزمتين منفصلتين تسيران في اتجاهين متعاكسين عبر أنابيب ضيقة يبلغ حجمها ٣ بوصات، وتمتد على مدى حلقة المصادم الموجودة تحت الأرض البالغ طولها ٢٧ كيلومترًا.

إن النفق البالغ عرضه ٣٫٨ أمتار (١٢ قدمًا)، الذي شُيِّدَ في ثمانينيات القرن العشرين، ويضم الآن حُزَمَ البروتونات في مرحلة تعجيلها الأخيرة؛ يتميَّز بالإضاءة الجيدة، وتكييف الهواء الجيد، واتساعه بما يسمح للسير في أرجائه بيُسْر، وهذا ما أُتِيحَتْ لي فرصةُ فِعْلِه بينما كان مصادم الهادرونات الكبير لا يزال في مرحلة التشييد.



شكل ٨-٢: المسار الذي يسلكه البروتون عند تعجيل مصادم الهادرونات الكبير له.

جُبتُ ذلك النفق لفترة قصيرة أثناء جولتي في المصادم، لكن ذلك استغرَقَ مني فترة أطول بكثير من الفترة البالغة ٨٩ جزءًا من المليون من الثانية التي تتطلَّبُها البروتونات المعجَّلة العالية الطاقة التي تنتقل بسرعة تبلغ ٩٩,٩٩٩٩٩٩١ في المائة من سرعة الضوء في هذا النفق.

يقع النفق على عمق نحو ١٠٠ متر تحت الأرض، ويتراوح عمقه على نحو الدقة من ٥٠ إلى ١٧٥ مترًا، ويقي هذا العمقُ سطحَ الأرض من الإشعاعات الناجمة عن التصادمات، وهو يعني أيضًا أن سيرن لم تضطر لشراء (وتدمير) كل الأرض الزراعية الواقعة فوق النفق أثناء مرحلة البناء. ومع ذلك، فإن حقوق الملكية تسبَّبَتْ بالفعل في تأخُّر حفر النفق في فترة الثمانينيات، عندما كان الهدف منه هو احتواء مصادم الإلكترونات-البوزيترونات الكبير. تمثَّلَتِ المشكلة آنذاك في أن حقوق الملكية لملَّاك الأراضي في فرنسا تمنحهم حقَّ ملكية المنطقة بأكملها من سطح الأرض وصولًا إلى مركزها، وليس فقط الأرض الزراعية التي يحرثونها؛ لذلك لم يكن من الممكن حفر النفق سوى بعد تصديق السلطات الفرنسية على العملية بتوقيع «إعلان منفعة عامة» يجعل من الصخور الموجودة تحت سطح الأرض — ونظريًّا الصُّهارة — ملكيةً عامةً.

ثمَّةَ جدلٌ قائم بين الفيزيائيين حول ما إذا كان السبب وراء الميل الموجود في قاع النفق جيولوجيًّا أم إنه مُعَدٌّ خصوصًا ليزيد من انحراف الإشعاع، لكن الحقيقة هي أن هذا الميل يساعد في كلا الأمرين. فالأرض غير المستوية كانت إحدى العقبات المهمة أمام عمق النفق وموقعه. والمنطقة الواقعة أسفل مقر سيرن تتكوَّن في الغالب من نوع من الصخور المضغوطة يسمَّى المولاس، لكن أسفل الرواسب البحرية والنهرية يوجد حصى ورمال وطفال تحتوي على مياه جوفية، وما كان ذلك المكان ليصلح لحفر النفق به؛ ومن ثَمَّ فإن الانحدار الموجود بالقاع يحافظ على وجود النفق بين الصخور المناسبة. وقد سمح أيضًا بأن يكون قسم واحد من النفق الموجود أسفل جبال جورا الجميلة الواقعة على أطراف سيرن أقل عمقًا، بحيث يكون من الأيسر (والأرخص) قليلًا إدخالُ العناصر وإخراجها من العواميد الرأسية في هذا الموقع.

والمجالات الكهربية المعجِّلة النهائية في هذا النفق ليست مرتَّبَة على نحو حلقي دقيق، وإنما يتكوَّن مصادم الهادرونات الكبير من ثمانية أقواس كبيرة بالتبادل مع ثمانية أقسام مستقيمة يبلغ طول كلٍّ منها ٧٠٠ متر، وكلٌّ من هذه الأقسام يمكن تسخينه وتبريده على نحو مستقل، ما يلعب دورًا مهمًّا في عمليات الإصلاح واستخدام المعدات. وبعد أن تدخل البروتونات النفق، فإنها تُعجَّل في كلٍّ من هذه الأقسام المستقيمة القصيرة بفعل الموجات اللاسلكية، مثلما حدث في مراحل التعجيل السابقة التي أوصلتها إلى مستوى طاقة الحقن. ويحدث التعجيل في «تجاويف الترددات اللاسلكية» التي تحتوي على إشارة لاسلكية يبلغ تردُّدها ٤٠٠ ميجا هرتز، وهو التردد ذاته الذي تستخدمه

عندما تفتح باب سيارتكَ عن بُعَدٍ. وعندما يعجِّل هذا المجال مجموعةً من البروتونات التي تدخل في أحد هذه التجاويف، تزيد طاقة البروتونات بمقدار ٤٨٥ جزءًا من المليار من التيرا إلكترون فولت فقط. قد تبدو هذه النسبة بسيطة، لكن البروتونات تدور في حلقة المصادم ١١ ألف مرة في الثانية؛ ومن ثَمَّ يستغرق الأمر ٢٠ دقيقة فقط لتعجيل حزمة البروتون لينتقل من طاقة الحقن الأولى له (٤٥٠ جيجا إلكترون فولت) إلى الطاقة المستهدَفة التي تبلغ ٧ تيرا إلكترون فولت؛ أي أكثر ١٥ مرة من طاقة الحقن الأولى. تُفقَد بعض البروتونات أثناء عمليات التصادم أو تنحرف شاردةً، لكن أغلبها يستمر في الدوران نصف يوم تقريبًا قبل أن تتبدَّدَ ويتمَّ التخلُّص منها في باطن الأرض، وتُستبدَل بها بروتونات مُحقَنة جديدة.

والبروتونات، التي تدور في حلقة المصادم، ليست موزَّعة بالتساوي، وإنما يُدفَع بها حول الحلقة في مجموعات (يبلغ عددها ٢٨٠٨ مجموعات) يحتوي كلٌّ منها على ١١٥ مليار بروتون. في البداية، يبلغ طول كل مجموعة ١٠ سنتيمترات وعرضها ملِّيمتر واحد، ويفصلها عن المجموعة التالية لها نحو ١٠ أمتار. يساعد ذلك في عملية التعجيل؛ إذ يتم تعجيل كل مجموعة على حدة، علاوة على ذلك، يضمن تجمعُ البروتونات في مجموعات على هذا النحو تفاعُلَ هذه المجموعات بعضها مع بعض على مدار فواصل زمنية تبلغ مدتها ٢٥–٧٥ نانوثانية على الأقل، وهي المدة الكافية لتسجيل تصادم كل مجموعة على حدة. ونظرًا لقلة عدد البروتونات في المجموعة عن الحزم بكثير، فإن عدد التصادمات التي تحدث في الوقت نفسه تكون تحت قدر أكبر من السيطرة؛ لأن المجموعات — وليس البروتونات بأكملها الموجودة في الحزمة — هي التي تتصادم في كل مرة.

مغناطيسات التبريد الثنائية القطب

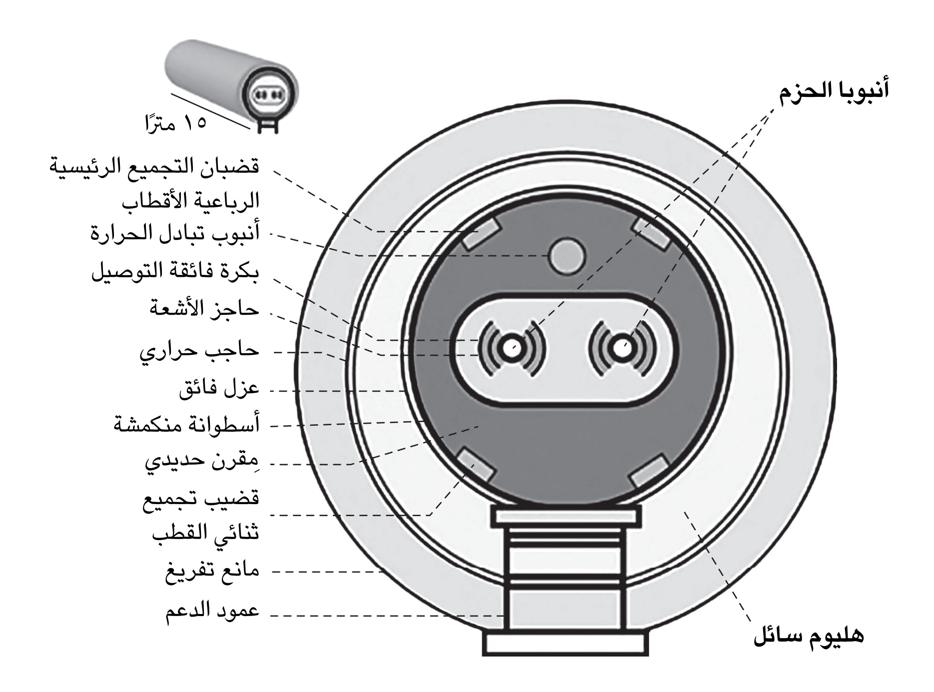
لا ريب أن تعجيل البروتونات للوصول إلى مستوًى عالٍ من الطاقة إنجاز مذهل، لكن الإنجاز التكنولوجي الاستثنائي بحق في تشييد مصادم الهادرونات الكبير هو تصميم المغناطيسات الثنائية القطب العالية المجال المغناطيسي، وإنشاؤها، للحفاظ على دوران البروتونات على نحو ملائم حول الحلقة. فبدون هذه المغناطيسات الثنائية القطب، ستتحرك البروتونات في خط مستقيم. ويتطلب الحفاظ على دوران البروتونات العالية الطاقة في حلقةٍ مجالًا مغناطيسيًّا هائلًا.

نظرًا لحجم النفق المُشيَّد بالفعل، كانت العقبة الهندسية الفنية الكبرى التي لزم على مهندسي مصادِم الهادرونات الكبير التغلُّب عليها هي بناء مغناطيسات على أكبر قدر ممكن من القوة من الناحية الصناعية، بمعنى أنه يمكن إنتاجها بكميات كبيرة؛ فيتطلب الأمر مجالًا قويًّا للحفاظ على البروتونات العالية الطاقة في المسار الصحيح داخل النفق الذي استُخْدِم من قبلُ في مصادم الإلكترونات–البوزيترونات الكبير. والحفاظ على دوران بروتونات ذات مستوًى أعلى من الطاقة يتطلَّب إما مغناطيسات أقوى وإما نفقًا أكبر، لتتمكَّن مسارات البروتونات من الانحناء بما فيه الكفاية للبقاء في المسار الصحيح. وفي حالة مصادم الهادرونات الكبير، كان حجم النفق محدَّدًا مسبقًا؛ ومن ثَمَّ كانت الطاقة المستهدفة محكومة بأقصى مجال مغناطيسي يمكن الوصول إليه.

كان من المفترض أن يوجد «المصادم الأمريكي الفائق ذو الموصلية الفائقة» — في حال استكماله — داخل نفق أكبر من ذلك بكثير (وهو النفق الذي بدأ حفره فعليًّا)، على أن يبلغ محيطه ٨٧ كيلومترًا. وكان مخططًا أيضًا أن يصل هذا المصادم إلى طاقة مقدارها ٤٠ تيرا إلكترون فولت؛ أي نحو ثلاثة أضعاف الطاقة المستهدفة لمصادم الهادرونات الكبير. وكان من الممكن الوصول إلى هذه الطاقة الهائلة بالفعل لأن المصادم الأمريكي صُمِّم من الصفر، دون أن يتقيَّدَ في حجمه بنفق موجود بالفعل وما يتطلَّبه ذلك من مجالات مغناطيسية هائلة غير واقعية. رغم ذلك، فإن الخطة الأوروبية المقترحة تفوَّقَتْ على هذا المصادم الأمريكي بميزة عملية؛ ألا وهي أن النفق والبنية التحتية العلمية والهندسية واللوجستية الخاصة بسيرن موجودة بالفعل.

وكان من أكثر الأشياء إبهارًا التي رأيتها عند زيارتي للمنظمة الأوروبية للأبحاث النووية نموذج أولي للمغناطيسات الأسطوانية الضخمة الثنائية القطب الموجودة في مصادم الهادرونات الكبير (انظر الشكل ٨-٣ للاطلاع على مقطع عرضي لها). يصل عدد هذه المغناطيسات إلى ١٢٣٢ مغناطيسًا، ويبلغ طول كلٍّ منها ١٥ مترًا ويزن ٣٠ طنًّا. ولم يتحدَّد الطول استنادًا إلى الاعتبارات الفيزيائية، وإنما إلى النفق الضيق نسبيًّا بمصادم الهادرونات الكبير، وقيود نقل المغناطيسات بالشاحنات على الطرق الأوروبية. ويكلِّف كلٌّ من هذه المغناطيسات ٧٠٠ ألف يورو، لتصل بذلك التكلفةُ الصافية لمغناطيسات مصادم الهادرونات الكبير وحدها إلى أكثر من مليار دولار.

تمتد الأنابيب الضيقة التي تحمل حُزَم البروتونات داخل المغناطيسات الثنائية القطب، التي تتصل أطرافها حتى تصل إلى نهاية الجزء الداخلي لنفق مصادم الهادرونات



شكل ٨-٣: مخطط لمغناطيس تبريد ثنائي القطب. تواصِل البروتونات دورانها حول حلقة مصادم الهادرونات الكبير بفضل ١٢٣٢ مغناطيسًا من هذه المغناطيسات الفائقة التوصيل.

الكبير. وتنتج هذه الأنابيب الضيقة مجالًا مغناطيسيًّا يمكن أن تصل قوته إلى ٨,٣ تسلا؛ أي ما يساوي حوالي ألف مرة مقدار المجال المغناطيسي لمغناطيس الثلاجة المتوسط الحجم. ومع زيادة طاقة حزم البروتونات من ٤٥٠ جيجا إلكترون فولت إلى ٧ تيرا فولت، يزيد المجال المغناطيسي من ٠,٥٤ إلى ٨,٣ تسلا، وذلك من أجل مواصلة دوره في توجيه البروتونات ذات المستوى المتزايد من الطاقة داخل المصادم.

والمجال المغناطيسي الذي تنتجه هذه المغناطيسات ضخم إلى حدٍّ يمكن أن يجعله يزيح المغناطيسات نفسها جانبًا في حال عدم وجود قيود تحول دون ذلك. وتتمثل هذه القيود في الشكل الهندسي للبكرات الذي يخفِّف من قوة هذا المجال. لكن ما يحافظ حقًّا

على المغناطيسات في مكانها هو الأطواق المصنَّعَة خصوصًا من صلب يبلغ سمكه أربعة سنتيمترات.

وتكنولوجيا التوصيل الفائق هي المسئولة عن المغناطيسات القوية التي يضمها مصادم الهادرونات الكبير. وقد استفاد مهندسو المصادم من هذه التكنولوجيا التي طُوِّرت من أجل المصادم الأمريكي الفائق ذي الموصلية الفائقة، ومصادم الإلكترونات-البوزيترونات الألماني الموجود في مركز المعجِّل الحلقي التزامني الألماني للإلكترونات في هامبورج.

تتميز الأسلاك العادية — مثل الأسلاك النحاسية الموجودة في منزلك — بمقاومتها، ويعني ذلك فقدان الطاقة عند مرور التيار الكهربي بهذه الأسلاك، أما الأسلاك الفائقة التوصيل، فلا تبدِّد الطاقة، وتسمح بمرور التيار الكهربي بها دون عرقلة؛ ومن ثَمَّ فإن بكرات الأسلاك الفائقة التوصيل يمكن أن تضم مجالات مغناطيسية هائلة تظهر بمجرد تشغيل هذه الأسلاك.

ويحتوي كل مغناطيس ثنائي القطب في مصادم الهادرونات الكبير على بكرات كابلات فائقة التوصيل مصنوعة من النيوبيوم والتيتانيوم، وكل كابل من هذه الكابلات مكوَّن من أسلاك رفيعة مجدولة لا يتجاوز سُمكها ٦ ميكرونات؛ أي أصغر بكثير من شعرة الإنسان. ويحتوي مصادم الهادرونات الكبير على ١٢٠٠ طن من هذه الأسلاك الرفيعة المميزة، التي إذا بُسِطت فستبلغ من الطول ما يكفي لتطويق مدار كوكب المريخ.

عندما تكون المغناطيسات الثنائية القطب قيد التشغيل، يجب أن تكون شديدة البرودة؛ وذلك لأنها لا تعمل إلا عندما تكون درجة الحرارة منخفضة بالقدر الكافي. وتتم المحافظة على درجة حرارة الأسلاك فائقة التوصيل عند ١٫٩ درجة فوق الصفر المطلق؛ أي ما يساوي ٢٧١ درجة مئوية تحت درجة حرارة تجمد المياه، وهذه الدرجة أقل من درجة حرارة إشعاع الخلفية الميكروني الكوني في الفضاء الخارجي، والتي تبلغ ٢٫٧ درجة. بعبارة أخرى، يضم نفق مصادم الهادرونات الكبير أكثر المناطق الممتدة برودةً في الكون بأسره، على الأقل وفق ما توصَّلَتْ إليه معرفتنا حتى الآن؛ ولذلك تُعرَف هذه المغناطيسات بمغناطيسات التبريد الثنائية القطب للتعبير عن طبيعتها التبريدية الخاصة.

إلى جانب تكنولوجيا الأسلاك الرفيعة المتميزة المُستخدَمة في المغناطيسات، يُعَدُّ نظام التبريد كذلك من الإنجازات المذهلة التي تجعل هذا المصادم يفوق غيره من المصادمات

الأخرى. وهذا النظام، في الواقع، هو الأكبر على الإطلاق في العالم. يحافظ الهليوم المتدفق على درجة الحرارة الشديدة الانخفاض هذه، فيحيط غلاف يبلغ نحو ٩٧ طنًّا متريًّا من الهليوم السائل بالمغناطيسات لتبريد الكابلات، وهو ليس غاز هليوم عادي، وإنما هليوم يتمتَّع بالضغط اللازم للحفاظ عليه في مرحلة «الميوعة الفائقة». والهليوم الفائق الميوعة ليس عرضة للُّزُوجَة التي تتعرض لها المواد العادية؛ ومن ثَمَّ يمكنه تبديد أي حرارة تنتج في نظام المغناطيسات الثنائية القطب بكفاءة مذهلة؛ فيتم تبريد ١٠ آلاف طنٍّ متري من النِّتروجين السائل أولًا، ويؤدي ذلك بدوره إلى تبريد ١٣٠ طنًّا متريًّا من الهليوم الذي يدور في المغناطيسات الثنائية القطب.

ومن الجدير بالذكر هنا أن ليس جميع أجزاء مصادم الهادرونات الكبير موجودةً تحت الأرض، فالمباني الموجودة فوق سطح الأرض تضم المعدات والأجهزة الإلكترونية وتجهيزات التبريد، والمبرد التقليدي يبرد الهليوم حتى درجة ٤٫٥ كلفن، ويحدث التبريد النهائي مع انخفاض الضغط. تستغرق هذه العملية (بالإضافة للتسخين) حوالي شهر، وهو ما يعني أنه في كل مرة يتم فيها تشغيل الماكينة وإيقاف تشغيلها، أو محاولة إجراء أي إصلاحات، سيتطلب التبريد وقتًا طويلًا ليحدث.

وفي حال وقوع أي خطأ — إذ يمكن، مثلًا، لقدرٍ طفيفٍ من السخونة أن يرفع درجة الحرارة — يَخمُد النظام، الأمر الذي يعني القضاء على الموصلية الفائقة. مثل هذا الخمود يمكن أن يكون كارثيًّا في حال عدم تبديد الطاقة على النحو الملائم؛ نظرًا لأن كل الطاقة المخزنة في المغناطيسات ستنبعث فجأةً؛ لذا يوجد نظام خاص للكشف عن حالات الخمود وتسريب الطاقة. يبحث هذا النظام عن الاختلافات في الجهد الكهربي غير المُتَّسِقة مع الموصلية الفائقة، وعند اكتشاف أيٍّ من هذه الاختلافات، تتسرب الطاقة في كل مكان في أقل من ثانية واحدة، وبذلك لا يصير المغناطيس الثنائي القطب فائقَ التوصيل.

حتى في ظل تكنولوجيا الموصلية الفائقة، تظل هناك حاجة لكميات هائلة من التيارات الكهربية للوصول إلى مجال مغناطيسي تبلغ قدرته ٨٫٣ تسلا. فتصل قوة التيار إلى نحو ١٢ ألف أمبير، وهو ما يفوق التيار المتدفق في المصباح الموجود على مكتبك بنحو ٤٠ ألف مرة.

ومع وجود التيار الكهربي والتبريد، يستخدم مصادم الهادرونات الكبير عند تشغيله كميةً هائلة من الكهرباء، وهي الكمية المساوية تقريبًا لما يتطلَّبه استهلاك مدينة صغيرة،

مثل مدينة جنيف القريبة من المصادم. ولتجنُّب تكاليف الطاقة الباهظة، يعمل المعجِّل حتى بداية شهور الشتاء الباردة بسويسرا فقط، والتي ترتفع فيها أسعار الكهرباء (فيما عدا عام ٢٠٠٩ الذي استمر فيه تشغيل المعجِّل في الشتاء). ولهذه السياسة ميزة أخرى تتمثَّل في منح المهندسين والعلماء العاملين في المصادم إجازةً طويلةً في أعياد الميلاد.

من الفراغ إلى التصادمات

إن آخِر جوانب تفوُّق مصادم الهادرونات الكبير هو الفراغ الموجود داخل الأنابيب التي تدور بها البروتونات. فينبغي الحفاظ على النظام خاليًا قدرَ الإمكان من أي مواد لا لزوم لها من أجل الحفاظ على الهليوم البارد؛ فأي جزيئات شاردة يمكن أن تنقل الحرارة والطاقة. والأهم من ذلك أن مناطق حزم البروتونات يجب أن تكون خاليةً من الغاز قدر الإمكان؛ ففي حال وجود غازات بها، يمكن أن تصطدم بها البروتونات، وتعوق التدوير الجيد لحزم البروتونات؛ ومن ثَمَّ فإن الضغط داخل الحزم بسيط للغاية، إذ يقل بمقدار ١٠ تريليونات مرة عن ضغط الغلاف الجوي، وهو الضغط الموجود على بُعْد مليون متر فوق سطح الأرض حيث يندر الهواء للغاية. وفي مصادم الهادرونات الكبير، تم تفريغ ٩٠٠٠ متر مكعب من الهواء للحصول على المساحة اللازمة لحركة حزمة البروتونات.

حتى مع هذا الضغط الشديد الانخفاض، يظل هناك ثلاثة ملايين جزيء من الغاز في كل سنتيمتر مكعب من الأنبوب؛ ومن ثَمَّ تصطدم البروتونات بين الحين والآخَر بهذه الجزيئات وتنحرف عن مسارها، وإذا اصطدمت كمية كافية من هذه البروتونات بأحد المغناطيسات الفائقة التوصيل، فستخمده وتقضي على الموصلية الفائقة له؛ ومن ثَمَّ تنظم موجهات الحزم الكربونية حزم البروتونات بمصادم الهادرونات الكبير لإزالة أي جسيمات شاردة عن الحزم تقع خارج الفتحة البالغ حجمها ثلاثة ملِّيمترات، وهي الفتحة الكبيرة بما يكفي للسماح للحزمة البالغ عرضها حوالي ملِّيمتر واحد بالمرور عبرها.

مع ذلك، يظل تنظيم البروتونات في مجموعات يبلغ عرضها ملِّيمترًا واحدًا مهمةً صعبة. ويحقِّق هذا نوع آخَر من المغناطيسات يُعرَف بالمغناطيسات الرباعية الأقطاب، وهي المغناطيسات التي تركِّز الحزمة وتضغطها على نحو فعَّال. ويحتوي مصادم الهادرونات الكبير على ٣٩٢ مغناطيسًا من هذا النوع. تشتِّتُ المغناطيسات الرباعية الأقطاب أيضًا حُزَم البروتونات من مساراتها المستقلة حتى تتمكَّن من التصادم فعليًّا.

ولا يمكن للحُزَم أن تتصادم تصادمًا دقيقًا أو مباشرًا تمامًا، وإنما تصطدم بزاوية متناهية الصغر تبلغ حوالي واحد على الألف من الزاوية نصف القطرية؛ وذلك لضمان تصادم مجموعة واحدة فقط من كل حزمة في المرة الواحدة، وبذلك تصبح البيانات أقل إرباكًا وتظل الحزمة سليمة.

وعند تصادم مجموعتين متقابلتين، يواجِه مائة مليار بروتون عددًا مماثلًا من البروتونات. والمغناطيسات الرباعية الأقطاب مسئولة أيضًا عن المهمة الصعبة المتمثِّلة في تركيز الحُزَم في المناطق التي تحدث بها التصادمات، وتُجرَى التجارب لتسجيل ما يقع من أحداث. في هذه المواقع، تعتصر المغناطيسات الحزم وصولًا إلى حجم دقيق يبلغ ١٦ ميكرونًا، ويجب أن تكون الحزمُ شديدةَ الصِّغَر والكثافة لزيادة احتمال عثور المائة مليار بروتون الموجودة في إحدى المجموعات على المائة مليار بروتون في المجموعة الأخرى عند تقاطعها.

لكن معظم البروتونات الموجودة في إحدى المجموعات لن تجد البروتونات الموجودة في المجموعة الأخرى، حتى عند توجيه كلٍّ منهما تجاه الأخرى ليحدث التصادم؛ فقطر البروتونات الفردية لا يتجاوز واحدًا على المليون من النانومتر. ويعني ذلك أنه على الرغم من الحفاظ على كل هذه البروتونات في صورة مجموعات يبلغ قطرها ١٦ ميكرونًا، لا يصطدم إلا نحو ٢٠ بروتونًا فقط تصادُمًا مباشِرًا في كل مرة تتقاطع فيها المجموعات.

وهذا في الحقيقة أمر طيب للغاية، فإذا حدث عدد كبير من التصادمات في آنٍ واحدٍ، فستكون البيانات محيِّرة، وسيكون من المحال تحديدُ أيِّ الجسيمات نتج عن أيٍّ التصادمات. ولا شك أن عدم حدوث تصادمات أيضًا أمر سيئ؛ فعن طريق تركيز هذا العدد من البروتونات فقط في هذا الحجم فحسب، يضمن مصادم الهادرونات الكبير وقوع العدد الأمثل من الأحداث في كل مرة تتقاطع فيها المجموعات.

وعندما تحدث تصادمات البروتونات الفردية، فإنها تقع في الوقت عينه تقريبًا؛ في وقت يقل عن الثانية الواحدة بمعامل قدره ٢٥، ويعني ذلك أن الفترة الزمنية بين تصادمات مجموعات البروتونات تتحدَّد بالكامل بمدى تكرُّر تقاطع المجموعات، والذي يحدث كل ٢٥ نانوثانية في أقصى قدرة له. فتتقاطع الحزم أكثر من عشرة ملايين مرة في الثانية الواحدة، ومع هذه التصادمات المتكررة، يُصدر مصادم الهادرونات الكبير كمية هائلة من البيانات، لنحو مليار تصادم في الثانية. ولحسن الحظ، الفترة الزمنية بين تقاطع المجموعات طويلة بما فيه الكفاية للسماح لأجهزة الكمبيوتر بمتابعة التصادمات الفردية المثيرة للاهتمام دون الخلط بين التصادمات التي نشأت في مجموعات مختلفة.

وبذلك يمكننا القول في النهاية إن الحدود القصوى لمصادم الهادرونات الكبير ضروريةٌ لضمان وقوع أكبر عدد ممكن من تصادمات الطاقة ومن الأحداث التي يمكن للتجارب التعامل معها. تواصِل أغلب الطاقة الدوران لكن لا يحدث سوى عدد نادر من أحداث تصادم البروتونات الجديرة بالاهتمام. ورغم الطاقة الهائلة للحزم، فلا تزيد طاقة تصادمات المجموعات الفردية إلا بقدر ضئيل عن الطاقة الحركية لبعض البعوض الطائر؛ فهذا تصادم للبروتونات، وليس للاعبي كرة قدم أو سيارات. وتعمل الحدود القصوى لمصادم الهادرونات الكبير على تركيز الطاقة في منطقة متناهية الصغر، وفي تصادمات الجسيمات الأولية التي يمكن للتجارب متابعتها. وسوف نتناول لاحقًا بعضًا من المكونات الخفية التي قد تعثر عليها هذه التجارب، والمعلومات الدقيقة عن طبيعة المادة والفضاء التي يطمح الفيزيائيون للتَّوَصُّل إليها من خلال هذه الاكتشافات.

الفصل التاسع

عودة الحلقة للعمل

التحقتُ بالدراسات العليا في مجال الفيزياء في عام ١٩٨٣، بينما طُرِحَتْ فكرة إنشاء مصادم الهادرونات الكبير للمرة الأولى في عام ١٩٨٤، معنى ذلك أنني انتظرت تشييد هذا المصادم مدة ربع قرن من مسيرتي الأكاديمية. والآن، وبعد طول انتظار، صرتُ أنا وأصدقائي نشهد أخيرًا البيانات الصادرة عن مصادم الهادرونات الكبير، ونبني توقعات واقعية بشأن المعلومات الدقيقة التي يمكن أن تكشف عنها التجارب قريبًا فيما يتعلق بالكتلة والطاقة والمادة.

يُعَدُّ مصادم الهادرونات الكبير حاليًّا أهم جهاز تجريبي لفيزيائيي الجسيمات على الإطلاق، ومع بدء تشغيل المصادم، صار زملائي الفيزيائيون أكثر توترًا وتشوقًا، وهو ما يمكن تفهُّمه. فلا يمكنك الدخول إلى أي قاعة ندوات دون أن تسمع تساؤلات بشأن ما يحدث، مثل: ما مقدار الطاقة التي ستحقِّقها التصادمات؟ ما عدد البروتونات التي ستحتوي عليها الحُزَم؟ طمح الفيزيائيون النظريون في استيعاب التفاصيل الدقيقة التي مثلت من قبلُ في الغالب مفاهيم مجردة للعاملين في مجال الحسابات والمفاهيم، وليس في مجال تصميم التجارب أو الماكينات. وكان العكس صحيحًا أيضًا؛ بمعنى أن الفيزيائيين التجريبيين تاقوا على نحو غير مسبوق لسماع أحدث الافتراضات، ومعرفة المزيد عمَّا يمكنهم البحث عنه واكتشافه.

بل إنه أثناء المؤتمر الذي عُقِد في شهر ديسمبر من عام ٢٠٠٩، والذي كان من المفترض أن يتناول موضوع المادة المظلمة، أخذ المشاركون يعلِّقون بحماس على مصادم الهادرونات الكبير الذي انتهى لتوِّه من أول عملية ناجحة من التعجيل والتصادم. آنذاك، وبعد اليأس الذي كاد يصيب العاملين على هذا المصادم واستمر أكثر من عام، غمرت البهجة الجميع؛ فسعد الفيزيائيون التجريبيون بحصولهم على البيانات التي يمكنهم دراستها لفهم الكواشف على نحو أفضل، كما اغتبط الفيزيائيون النظريون باحتمال حصولهم على بعض الإجابات في القريب العاجل. كان كل شيء يسير على أفضل وجه؛ فالحُزَم بدا أنها تعمل على نحو جيد، والتصادمات حدثت بالفعل، والتجارب تسجِّل كل ذلك.

لكن الوصول إلى هذه المرحلة المهمة وراءه قصة طويلة، وقد خصَّصْتُ هذا الفصل لروايتها وعرض ما انطوت عليه من عقبات.

يا له من عالم صغير!

سبقت قصة سيرن قصة مصادم الهادرونات الكبير بعدة عقود من الزمان؛ فبعد أن وضعت الحرب العالمية الثانية أوزارها بفترة قصيرة، طُرِح أول تصوُّر لمركز تعجيل أوروبي تُجرَى فيه تجارب لدراسة الجسيمات الأولية. رغب آنذاك العديد من الفيزيائيين الأوروبيين — الذين هاجَرَ بعضهم إلى الولايات المتحدة وظل البعض الآخَر في فرنسا وإيطاليا والدنمارك — في أن يشهدوا عودة العلوم المتقدمة إلى بلادهم، واتفق الأمريكيون والأوروبيون على أنه من مصلحة كلٍّ من العلم والعلماء تعاوُنُ الأوروبيين في هذا المشروع المشترك، وأن تعود الأبحاث إلى أوروبا ليتمكَّنوا بذلك من إصلاح آثار الدمار وانعدام الثقة التي خلَّفتها الحرب التي انتهت لتوِّها.

وفي مؤتمر لمنظمة اليونيسكو عُقِد في فلورنسا عام ١٩٥٠، أوصى الفيزيائي الأمريكي أيزيدور رابي بإنشاء مختبر من شأنه إعادة تأسيس مجتمع علمي قوي في أوروبا؛ ومن ثَمَّ تأسَّسَتْ في عام ١٩٥٢ المنظمة الأوروبية للأبحاث النووية تحت الاسم الفرنسي Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (ومن هنا جاء الاختصار «سيرن») لتحقيق هذا الهدف. وفي الأول من يوليو من عام ١٩٥٣، اجتمَعَ ممثِّلو اثنتي عشرة دولة أوروبية لإنشاء المؤسسة التي عُرِفت فيما بعدُ باسمها الإنجليزي الحالي The European Organization for Nuclear Research، وتم التصديق على

اتفاق تأسيسها في العام التالي، ولم يَعُدْ هذا الاسم يعبِّر عمَّا يجريه هذا المركز البحثي من أعمال؛ إذ إننا ندرس فيه الآن الفيزياء دون النووية، أو فيزياء الجسيمات. لكن كما هو الحال غالبًا مع البيروقراطية، ظلَّ الاسم كما هو.

شُيِّدت منشأة سيرن عن قصد في منتصف أوروبا بموقع يمر بالحدود السويسرية الفرنسية بالقرب من جنيف. يتسم الموقع بجماله الأخَّاذ الذي يدفعك لزيارته إذا كنتَ ممَّن يفضِّلون المناظِرَ الطبيعية؛ فهو يشمل أرضًا زراعية وتجاوره جبال جورا، إلى جانب جبال الألب القريبة للغاية أيضًا منها. والفيزيائيون التجريبيون في المنظمة هم بالأحرى مجموعة من الرياضيين، نظرًا لتمكُّنِهم من ممارسة رياضات التزلج وتسلُّق الجبال وركوب الدراجات بسهولة ويسر. والموقع الذي تقع فيه المنظمة ضخم، إذ يغطِّي مساحةً من الأرض يمكن الركض فيها حتى الإنهاك، مما يحافظ على اللياقة البدنية للباحثين. وتحمل الشوارع التي تمر بها لزيارة الموقع أسماء الفيزيائيين المشهورين، ومنها على سبيل المثال «طريق كوري»، و«طريق باولي»، و«طريق أينشتاين»، لكن الهندسة المعمارية المُتبَعة في بناء المنشأة كانت ضحية العصر الذي شُيِّدت فيه، وهو أواخر الخمسينيات؛ حيث انتشرت المباني المنخفضة ذات الطابع العالمي التي تخلو من أي مظهر جمالي؛ ومن ثَمَّ تفتقر مباني المنشأة لمظاهر الجمال، وتمتد فيها الأروقة الطويلة والمكاتب ذات المظهر العقيم، وما زاد الأمر سوءًا أن المبنى عبارة عن منشأة علمية. ليس عليك سوى النظر إلى مباني دراسة العلوم في أي جامعة لتدرك ما أتحدَّث عنه هنا؛ فهي المباني الأكثر قبحًا في أي حرم جامعي، لكن ما يبعث البهجة والحياة في المكان (إلى جانب المناظر الطبيعية الخلَّابة) هو العاملون فيه، وأهدافهم وإنجازاتهم العلمية والهندسية.

ويمكن دراسة تطوُّر سيرن وما تجريه حاليًّا من عمليات عن طريق تناول صور التعاون الدولي التي انطوت عليها؛ فلعل هذه المنظمة المشروع الدولي الأكثر نجاحًا على الإطلاق. حتى في أعقاب الحرب العالمية الثانية، وبينما كانت الدول قد خرجت لتوِّها من صراع مع بعضها البعض، شارَكَ علماء ينتمون إلى اثنتي عشرة دولة مختلفة في هذا المشروع المشترك.

وإن كان للمنافسة أي دور يُذكَر في هذه المنظمة، فقد تمثَّلَ بشكل أساسي في منافسة الولايات المتحدة وما نجحت فيه من محاولات علمية بارزة. فإلى الوقت الذي توصَّلَتْ فيه التجاربُ في سيرن إلى البوزونات المقياسية W وZ، كانت جميع الاكتشافات في فيزياء

الجسيمات قد ظهرت في المعجِّلات الموجودة في أمريكا. ولعل الفيزيائي المخمور، الذي دخل مسكن الطلاب بمركز فيرميلاب حيث التحقت بالدراسة الصيفية في عام ١٩٨٢، وما قاله بشأن «ضرورة توصُّل الأوروبيين للبوزونات الاتجاهية اللعينة» والقضاء على السيادة الأمريكية في هذا المجال؛ قد عبَّرَ عن وجهة نظر العديد من الفيزيائيين الأوروبيين في ذلك الوقت، وإن فعل ذلك على نحو وَقِح يفتقر إلى البلاغة.

لقد اكتشف علماء سيرن هذه البوزونات بالفعل. والآن، ومع وجود مصادم الهادرونات الكبير، صارت هذه المنظمة تمثِّل محورَ فيزياء الجسيمات التجريبية بلا منازع. رغم ذلك، لم يكن هذا المتوقع بأي حال من الأحوال عند طرح فكرة المصادم للمرة الأولى؛ فكان من المنتظر من المصادم الأمريكي الفائق ذي الموصلية الفائقة، الذي صدَّق عليه الرئيس ريجان في عام ١٩٨٧، أن تفوق طاقته طاقة مصادم الهادرونات الكبير ثلاث مرات، حال مواصلة دعم الكونجرس له. ورغم عدم دعم حكومة كلينتون في البداية لذلك المشروع، الذي شرعت فيه حكومة الجمهوريين السابقة، تغيَّرَ ذلك الوضع بعد استيعاب الرئيس كلينتون للأمر. وفي يونيو عام ١٩٩٣، حاوَلَ كلينتون الحيلولة دون إلغاء المشروع بإرساله خطابًا إلى ويليام ناتشر، رئيس لجنة الاعتمادات المالية التابعة لمجلس النوَّاب الأمريكي، أخبره فيه بما يلي: «أودُّ إبلاغك باستمرار دعمي للمصادِم الفائق ذي الموصلية الفائقة ... فالتخلي عن هذا المشروع في هذه المرحلة يعني مجازفة الولايات المتحدة بمكانتها الرائدة في العلوم الأساسية، وهي المكانة التي لم ينازعها أحدٌ عليها لأجيال عدة. تمر بلادنا بظروف اقتصادية عصيبة، لكن الحكومة تدعم هذا المشروع كجزء من استثماراتها الواسعة النطاق في مجال العلم والتكنولوجيا ... وأطلب منك ها هنا دعم هذه الجهود المهمة الزاخرة بالتحديات.» وعندما التقيت بهذا الرئيس السابق في عام ٢٠٠٥، ذَكر موضوع المصادم الفائق ذي الموصلية الفائقة، وسألني عما خسرناه جرَّاء التخلِّي عن ذلك المشروع، وأقَرَّ سريعًا بأنه رأى أن الإنسانية قد خسرت فرصةً في غاية الأهمية.

في الوقت الذي قضى فيه الكونجرس على ذلك المشروع، تكَبَّدَ دافعو الضرائب نحو ١٥٠ مليار دولار في أزمة القروض والمدخرات، وهو ما يتجاوز بكثير التكلفة المحدَّدة للمصادم والبالغة حوالي ١٠ مليارات دولار. على الجانب الآخَر، يصل العجز السنوي الأمريكي ٦٠٠ دولار عن كل مواطن، وتكلفة الحرب على العراق أكثر من ٢٠٠٠ دولار عن كل مواطن. وإذا كان المصادم الفائق ذو الموصلية الفائقة قد شُيِّد، لَكُنَّا قد توصَّلْنا

بالفعل إلى نتائج تخصُّ فيزياء الطاقات العالية، وكنَّا بلغنا مستويات من الطاقة أعلى بكثير مما سيحقِّقها مصادم الهادرونات الكبير. ومع انتهاء أزمة القروض والمدخرات، تأثَّرْنا سريعًا بالأزمة المالية في عام ٢٠٠٨، ولزم علينا جمع قدر من الأموال أرهق دافعي الضرائب.

وتكلفة بناء مصادم الهادرونات الكبير — البالغة ٩ مليارات دولار — مساوية تقريبًا للتكلفة التي اقتُرِحَتْ للمصادم الفائق ذي الموصلية الفائقة، فتبلغ التكلفة نحو ١٥ دولارًا لكل مواطن أوروبي؛ أي ما يساوي سعر كوب جعة لكل مواطن أوروبي في العام في وقت تشييد مصادم الهادرونات الكبير، كما يقول زميلي بسيرن، لويس ألباريث جومي. وتقييم قيمة الأبحاث العلمية الأساسية، كتلك التي تُجرَى في مصادم الهادرونات الكبير، ينطوي دومًا على صعوبات. لكن الواقع يشير إلى أن الأبحاث الأساسية هي القوة الدافعة وراء ظهور الكهرباء، وشبه الموصلات، والشبكة العنكبوتية العالمية، وجميع صور التقدُّم التكنولوجي الأخرى التي أثَّرت في حياتنا تأثيرًا هائلًا. تشجِّع هذه الأبحاث أيضًا التفكير العلمي والتكنولوجي الذي ينتشر في جميع جوانب النظام الاقتصادي، وقد يكون من الصعب التكهُّن بالنتائج العملية لمصادم الهادرونات الكبير، لكن ما لا يصعب التكهُّن به هو قدرات العلم. وأعتقد أنه لا خلاف في هذا السياق على زيادة احتمال جَنْي الأوروبيين لقيمة ما أنفقوه من أموال في هذا المشروع.

تتطلب المشروعات الطويلة الأمد إيمانًا، وتفانيًا، وشعورًا بالمسئولية. مثل هذه الالتزامات صار من الصعب رؤيتها في الولايات المتحدة؛ فقد أدَّتْ رؤيتنا السابقة في الولايات المتحدة إلى تطورات علمية وتكنولوجية هائلة، لكن هذا النوع من التخطيط الضروري طويل الأمد يزداد ندرةً الآن. وعلينا الاعتراف هنا بأن المجتمع الأوروبي لا يزال قادرًا على السعي وراء مشروعاته حتى يراها واقعًا أمام عينيه؛ فقد وُضِع التصور الأول لمصادم الهادرونات الكبير منذ ربع قرن، وتمت المصادقة عليه في عام ١٩٩٤، لكنه مشروع طموح لم يُؤْت ثماره سوى الآن.

بالإضافة إلى ما سبق، وسَّعت سيرن نطاق شعبيتها الدولية بحيث لم تقتصر على الدول الأعضاء بها البالغ عددها ٢٠ دولة فقط، وإنما امتدت لتشمل ٥٣ دولة أخرى شاركت في التصميم والإنشاء واختبار الأجهزة، وصار يشارك في المنظمة الآن علماء ينتمون إلى ٨٥ دولة. ورغم أن الولايات المتحدة ليست إحدى الدول الأعضاء الرسمية بالمنظمة، فإن عدد الأمريكيين الذين يعملون فيها على التجارب الرئيسية يفوق أي جنسية أخرى.

يبلغ إجمالي عدد العلماء المشاركين في المنظمة نحو ١٠ آلاف عالم؛ أي ما يساوي حوالي نصف عدد فيزيائيي الجسيمات في العالم بأسره، وخُمس هذا العدد موظفون بدوام كامل ويقيمون بالقرب من المنظمة. ومع بناء مصادم الهادرونات الكبير، صارت الكافيتريا الرئيسية بالمنظمة مكتظَّة بالوافدين عليها إلى الحد الذي أصبح من الصعب طلب الطعام فيها دون أن تصطدم الصينية الخاصة بك بفيزيائي آخَر؛ المشكلة التي يساعد التوسُّع الجديد الذي تشهده الكافيتريا في التخفيف منها.

وفي ظل الجنسيات المختلفة التي تضمها المنظمة، سيُصدَم أي أمريكي عند دخولها عند سماعه اللغات واللهجات العديدة التي تتردَّد في الكافيتريات والمكاتب والأروقة. سيلفت انتباه الأمريكي أيضًا السجائر، والنبيذ، والبيرة؛ الأمور التي من شأنها أيضًا تذكيره باغترابه عن وطنه. يعلِّق البعض كذلك على الجودة الفائقة للكافيتريات، وهذا ما أخبرني به أحد طلَّابي المبتدئين، والذي عمل في المنظمة خلال فصل الصيف. لكن الأوروبيين — بما يتمتَّعون به من ذوق رفيع في الطعام — يجدون أن هذا التقييم لجودة الكافيتريات موضع شك.

تتنوع الأعداد الكبيرة من الموظفين والزائرين بسيرن ما بين مهندسين وإداريين وفيزيائيين عديدين يُجْرُون التجارب بالفعل، إلى جانب ما يزيد عن ١٠٠ فيزيائيٍّ يشاركون في قسم النظريات في أي وقت. والمنظمة ذات هيكل هرمي يتولَّى فيه المديرون والمجلس مسئولية جميع شئون السياسات، بما في ذلك القرارات الاستراتيجية المهمة. ويُعرَف رئيس المؤسسة بالمدير العام، أما مجلس المنظمة، فهو الجهاز المسئول عن القرارات الاستراتيجية المهمة، مثل التخطيط للمشروعات ووَضْع جداول زمنية لها. وتولي المنظمة اهتمامًا خاصًّا بلجنة السياسات العلمية التي تمثِّل المجلس الاستشاري الرئيسي الذي يساعد في تقييم المقترحات وفائدتها العلمية.

تتسم، أيضًا، المشروعات التجريبية التعاونية الكبيرة، التي يشارك فيها الآلاف من العلماء، بهيكل خاص بها؛ فيتوزَّع العمل وفق مكونات الكواشف أو أنواع التحليل، فيمكن أن تكون مجموعة جامعية معينة مسئولة عن جزء واحد محدَّد من الجهاز أو نوع واحد معين من التفسير النظري المحتمل. والفيزيائيون النظريون في سيرن يتمتعون بحرية تفوق تلك التي يتمتع بها الفيزيائيون التجريبيون فيما يتعلق بالعمل على أي شيء يرونه مهمًّا. وقد يرتبط عملهم أحيانًا بالتجارب التي تُجرَى في المنظمة، لكن الكثيرين منهم يعملون على أفكار أكثر تجريديةً لن تخضع للاختبار في أي وقت قريب.

وأخيرًا، فإن الأمر الذي لا جدال فيه هو أن فيزيائيي الجسيمات في سيرن وجميع أنحاء العالم متحمسون بشأن مصادم الهادرونات الكبير، وهم يعلمون أن أبحاثهم المستقبلية ومستقبل المجال ذاته يعتمد على التشغيل الناجح والاكتشافات التي ستتم في غضون الأعوام العشرة إلى العشرين القادمة، هذا فضلًا عن إدراكهم التحديات التي ينطوي عليها الأمر، لكن جميعهم على ثقة بجوانب التفوق التي يتمتَّع بها هذا المشروع.

سرد مختصر لتاريخ مصادم الهادرونات الكبير

لين إيفانز هو المهندس الذي تولَّى مسئولية تشييد مصادم الهادرونات الكبير، ورغم استماعي إلى خطابه الرائع في ويلز عام ٢٠٠٩، لم أَلْتَقِ به إلا مؤخرًا في مؤتمرٍ عُقِدَ في كاليفورنيا في بداية عام ٢٠١٠، وقد كان توقيتًا مناسبًا؛ إذ كان المصادم يعمل أخيرًا وفق ما كان مخطَّطًا له. وبالرغم من أن هذا الرجل الويلزي لم يَنَلْ ما يستحقه من التقدير، فقد كان السرور واضحًا على وجهه في ذلك اليوم.

ألقى لين خطبةً رائعةً بشأن الإنجازات التي حقَّقها وما اعترضه من مشكلات منذ شروعه في تشييد المصادم. أخذ يروي لنا عن البداية الفعلية للفكرة في الثمانينيات عندما أجرت سيرن الدراسات الرسمية الأولى حول خيار إنشاء مصادم بروتونات عالي الطاقة، وبعد ذلك روى لنا عن لقاء عام ١٩٨٤ الذي يعتبره أغلب الناس الطرحَ الرسميَّ للفكرة للمرة الأولى. التقى الفيزيائيون آنذاك مع مشيدي المصادم في مدينة لوزان السويسرية لطرح فكرة مصادمة حزم البروتونات معًا بطاقة تبلغ ١٠ تيرا إلكترون فولت، وانخفض هذا المقدار المُقترَح ليصل إلى ٧ تيرا إلكترون فولت في التنفيذ النهائي. وبعد نحو عقد من الزمان، في ديسمبر ١٩٩٣، قدَّمَ الفيزيائيون خطةً جريئةً لمجلس سيرن، وهو الجهاز المتحكِّم بالمنظمة في القرارات الاستراتيجية المهمة. تمثَّلَتْ هذه الخطة في تشييد مصادم الهادرونات الكبير خلال السنوات العشر التالية، عن طريق تخفيض الجهود في جميع البرامج التجريبية الأخرى بالمنظمة إلى الحد الأدنى لها، فيما عدا مصادم الإلكترونات-البوزيترونات الكبير. لكن المجلس رفض الخطة آنذاك.

في البداية، كانت إحدى الحُجَج المناهضة لمصادم الهادرونات الكبير هي المنافسة الهائلة التي يفرضها المصادم الفائق ذو الموصلية الفائقة، لكن هذا التخوُّف زال مع توقُّف ذلك المشروع في أكتوبر ١٩٩٣. وهكذا، صار مصادم الهادرونات الكبير هو الاقتراح الوحيد للمعجل الفائق الطاقة؛ ومن ثَمَّ تزايَدَ اقتناع الكثير من الفيزيائيين

بأهمية المشروع. وفوق كل ذلك، حقَّقَتِ الأبحاث المتعلقة بالمصادم نجاحًا هائلًا. ترأَّسَ روبرت أيمار — الذي صار بعد ذلك رئيسًا لمنظمة سيرن أثناء مرحلة تشييد مصادم الهادرونات الكبير — لجنةَ مراجعة في نوفمبر ١٩٩٣ قضَتْ بأن المصادمَ قابلٌ للتنفيذ، واقتصاديٌّ، وآمِنٌ.

لكن العقبة الأساسية التي واجَهَها تخطيطُ مصادم الهادرونات الكبير تمثَّلَتْ في تطوير مغناطيسات على قدر كافٍ من القوة، ويمكن إنتاجها صناعيًّا للإبقاء على البروتونات ذات المستوى العالي من التعجيل في حالة دوران دائم في الحلقة. وكما رأينا في الفصل السابق، فرض حجم النفق القائم آنذاك بالفعل أكبر التحديات الفنية التي واجَهَها المصادِم؛ إذ كان نصف قطره ثابتًا؛ ومن ثَمَّ كان على المجالات المغناطيسية أن تكون ضخمة. وصَفَ لين بحبور في خطابه «الدقةَ السويسرية» للنموذج الأولي للمغناطيس الثنائي القطب البالغ طوله ١٠ أمتار، الذي نجح المهندسون والفيزيائيون في اختباره عام ١٩٩٤؛ فوصل العلماء إلى ٨٫٧٣ تسلا في محاولتهم الأولى، وكان هذا المقدار الذي كانوا يهدفون إليه بالفعل، كما كان دلالةً واعدةً للغاية على نجاح المشروع.

لكن لسوء الحظ، ورغم أن التمويل الأوروبي أكثر استقرارًا من التمويل الأمريكي، فرَضَتِ الضغوطُ غير المتوقعة في هذا الشأن مشكلات بشأن تمويل سيرن أيضًا. فواجَهَتْ ميزانية ألمانيا، التي كانت تساهم بمعظم تمويل المنظمة، أزمةً جرَّاء عملية إعادة التوحيد التي شهدتها البلاد في عام ١٩٩٠؛ ومن ثَمَّ خفضت ألمانيا مساهماتها في المنظمة، وانضمت إلى المملكة المتحدة في عدم الرغبة في أي زيادة كبيرة في ميزانية المنظمة. وقد كان كريستوفر ليولين سميث — الفيزيائي النظري البريطاني الذي خلف كارلو روبيا (الفيزيائي الحاصل على جائزة نوبل) في شغل منصب المدير العام للمنظمة — مشابهًا لسلفه في المنصب من حيث الدعم القوي لمصادم الهادرونات الكبير. وقد خفَّف ليولين سميث بعض الشيء من المشكلات الخطيرة المتعلقة بالميزانية، وذلك من خلال حصوله على تمويل من سويسرا وفرنسا، وهما الدولتان المضيفتان اللتان كان تشييد المصادم وتشغيله على أراضيهما سيعود عليهما على الأرجح بأكبر قدر من الفائدة.

انبهَرَ مجلس سيرن بكلٍّ من التكنولوجيا المقترَحة والحل المتعلِّق بالميزانية، ووافَقَ على تشييد مصادم الهادرونات الكبير بعد ذلك بفترة وجيزة في ١٦ ديسمبر عام ١٩٩٤. بالإضافة إلى ذلك، أقنع ليولين سميث والمنظمةُ الدولَ غير الأعضاء بالانضمام إلى المشروع والمساهمة فيه؛ فانضمت اليابان له في عام ١٩٩٥، والهند في عام ١٩٩٦، ثم روسيا وكندا بعد فترة وجيزة، والولايات المتحدة في عام ١٩٩٧.

وبفضل إسهامات الدول الأوروبية وغيرها من الدول الأخرى، تمكَّنَ مصادم الهادرونات الكبير من تجاوُز الشرط المنصوص عليه في المعاهدة الأصلية التي اشترطَتِ التشييدَ والتشغيلَ على مرحلتين، على ألَّا تتضمَّنَ المرحلة الأولى سوى ثلثَيْ عدد المغناطيسات. من الناحية العلمية والتكلفة الكلية، كان المجال المغناطيسي المنخفض خيارًا سيئًا، لكن الهدف الأساسي من هذا الشرط تمثَّلَ في إتاحة الفرصة للميزانيات بتحقيق التوازن كل عام. وفي عام ١٩٩٦، عندما خفضت ألمانيا من مساهمتها ثانيةً في المشروع بسبب تكاليف إعادة التوحيد، بدا الموقف المالي سيئًا مرةً أخرى. لكن في عام ١٩٩٧، تمكَّنَتْ سيرن من تعويض خسارتها عن طريق اللجوء للقروض للمرة الأولى من أجل تمويل عملية الإنشاء.

بعد سرد لين للحقائق المجردة المتعلقة بميزانية المشروع، انتقل في خطابه إلى بعض المسائل المبهجة، فوصف أول «سلسلة اختبار» للمغناطيسات الثنائية القطب — أي اختبار المغناطيسات المتجمعة معًا في تكوينٍ قابلٍ للتشغيل — وأُجرِيت في ديسمبر ١٩٩٨. وقد أثبَتَ نجاحُ هذا الاختبار قابليةَ الاستمرار والتنسيق في العديد من مكونات مصادم الهادرونات الكبير، وكان علامةً بارزةً في تطويره.

وفي عام ٢٠٠٠، وبعد إيقاف العمل بمصادم الإلكترونات-البوزيترونات الكبير، تمَّ تفكيكه لإفساح المجال لتركيب مصادم الهادرونات الكبير. لكن رغم تشييد مصادم الهادرونات الكبير في نفق مُشيَّد بالفعل، واستخدامه لبعض العاملين والمرافق والبنية التحتية التي كانت موجودةً بالفعل، استلزَمَ الأمر العديدَ من ساعات العمل والموارد قبل تحويل مصادم الإلكترونات-البوزيترونات الكبير إلى مصادم الهادرونات الكبير.

والمراحل الخمس لتطوير مصادم الهادرونات الكبير تضمَّنَتْ هندسةً مدنيةً لبناء التجاويف والهياكل اللازمة لإجراء التجارب، وإقامة الخدمات العامة اللازمة لتشغيل كل شيء، وإدخال خط التبريد للحفاظ على المعجِّل باردًا، وتجهيز جميع عناصر الماكينة بما في ذلك المغناطيسات الثنائية القطب وجميع التوصيلات والكابلات المرتبطة بها، وأخيرًا تشغيل جميع الأجهزة لضمان عملها كما هو متوقَّع.

بدأ المخططون في سيرن عملهم بجدول زمني دقيق للتنسيق بين هذه المراحل المختلفة للبناء، لكن كما هو معلوم للجميع، حتى أفضل الخطط يمكن أن تفشل، ولا حاجة للقول إنَّ هذا ما حدَثَ بالضبط.

كانت المشكلات المتعلِّقة بالميزانية مصدرَ إزعاجٍ دائمًا، ولَعلِّي أتذكَّر الآن الإحباط والمخاوف التي انتابتنا نحن — العاملين — في مجالِ فيزياء الجسيمات في عام ٢٠٠١

أثناء انتظارنا حلَّ هذه المشكلات، لنكتشف في النهاية مدى السرعة التي يمكن لبعض مشكلات الميزانية الخطيرة أن تُحَلَّ بها، الأمر الذي سمح باستمرار تشييد المصادم. فتعاملت إدارة منظمة سيرن مع عجز التكاليف، لكن على حساب اتساع المنظمة وبنيتها التحتية.

لكن حتى بعد أن حُلَّتْ هذه المشكلات المتعلقة بالتمويل والميزانية، ظلَّتْ هناك مشكلات أخرى تحيط بتشييد المصادم؛ فوصف لين في حديثه كيف أن سلسلة من الأحداث غير المتوقعة أدَّتْ دوريًّا إلى الإبطاء من سرعة بناء المصادم.

ما كان أحد، بالتأكيد، من المشاركين في حفر تجويف «تجربة اللولب المركب للميوونات» ليتوقع العثور على فيلا رومانية من عصر الغاليين يعود تاريخها إلى القرن الرابع الميلادي أثناء الحفر، فكانت حدود تلك الفيلا موازيةً لحدود المزرعة التي لا تزال موجودةً حتى الآن. وتوقَّفَ الحفر إلى أن فحص علماء الآثار ذلك الكنز المدفون الذي تضمَّنَ بعضَ العملات المعدنية من أوستيا وليون ولندن (وهي المدن التي كانت تُعرَف باسم أوستيوم، ولجدونوم، ولندنيوم في الوقت الذي كانت فيه هذه الفيلا آهِلة بالسكان). من الواضح أن الرومانيين تفوَّقوا في سكِّ عملة مشتركة لهم على أوروبا المعاصرة التي لا يزال اليورو لم يحلَّ فيها محلَّ الجنيه الاسترليني والفرانك السويسري بعدُ، الأمر الذي شكَّل إزعاجًا بالأخص للفيزيائيين البريطانيين في سيرن الذين لم تتوفَّر لديهم العملة التي يمكنهم دفع أجرة التاكسي بها.

على عكس الصعاب التي واجهتها تجربة اللولب المركب للميوونات، مرَّتْ عملية حفر تجويف كاشف أطلس (جهاز المصادم الحلقي) دون عراقيل نسبيًّا. وقد تضمَّنَ حفْرُ هذا التجويف إزاحةَ ٣٠٠ ألف طن متري من الصخور، والمشكلة الوحيدة التي واجَهَتِ القائمين على هذا العمل تمثَّلت في أنه بمجرد إزالة الصخور، بدأت أرضية التجويف في الارتفاع قليلًا، بمعدل نحو ملِّيمتر واحد كل عام. قد لا يبدو ذلك قدرًا كبيرًا، لكن هذه الحركة كان من شأنها نظريًّا التداخل مع المحاذاة الدقيقة لأجزاء الكاشف؛ لذا لزم على المهندسين تركيب أجهزة قياس حساسة. كانت هذه الأجهزة على درجة عالية من الفعالية سمحت لها ليس فقط بالكشف عن حركات كاشف أطلس، وإنما أيضًا بتسجيل إعصار تسونامي عام ٢٠٠٤، وزلزال سوماترا الذي تسبَّبَ في ذلك الإعصار، هذا فضلًا عن أحداث أخرى وقعت فيما بعدُ.

كانت عملية بناء تجربة أطلس على عمق كبير تحت الأرض مبهرة حقًّا، فتمَّ صبُّ السقف على سطح الأرض وتعليقه باستخدام الكابلات، في حين بُنِيت الحوائط من أسفل

حتى صار من الممكن إقامة السرداب عليها. وفي عام ٢٠٠٣، أُقِيمَ احتفالٌ للانتهاء من أعمال الحفر عَلَتْ فيه أصداءُ الأبواق الجبلية الطويلة التي نُفِخ فيها داخل التجويف، الأمر الذي وصفه لين بأنه كان ممتعًا للغاية. وبعد تركيب الجهاز التجريبي وتجميعه، أُنزِلت المكونات واحدًا تلو الآخَر حتى استُكْمِلَ تجميع تجربة أطلس بهذا الأسلوب الأشبه بوضع «سفينة ورقية داخل زجاجة».

على الجانب الآخَر، ظلَّتِ العقبات تواجِه إعداداتِ تجربة اللولب المركَّب للميوونات، فواجهت التجربة مجدَّدًا مشكلةً أخرى أثناء الحفر؛ إذ اكتُشِفَ — لسوء الحظ — أن مكان التجربة لم يقع أسفله موقع أثري نادر فحسب، وإنما أيضًا نهر جوفي. ومع هطول الأمطار الغزيرة ذلك العام، فوجئ المهندسون والفيزيائيون بأن الأسطوانة البالغ طولها ٧٠ مترًا التي أدخلوها في الأرض لنقل المواد إلى أسفل قد غطست بعمق ٣٠ سنتيمترًا، وللتعامل مع هذا العائق المؤسف، أقام الحفَّارون جدرانًا جليدية بمحاذاة جدران الأسطوانة بهدف تجميد الأرض وتحقيق الاستقرار للمنطقة، لزم كذلك تركيب بِنى داعمة لتحقيق الاستقرار للصخرة الضعيفة المحيطة بالتجويف، وتضمَّنَتْ هذه البِنى بَراغِيَّ يصل طولها إلى ٤٠ مترًا؛ ومن ثَمَّ لا عجب أن الحفر لإجراء تجربة اللولب المركب للميوونات استغرق أكثر من الوقت المتوقَّع له.

ما أنقذ الموقف هو الحجم الصغير نسبيًّا لتجربة اللولب المركب للميوونات. ونظرًا لهذا الحجم، كان الفيزيائيون التجريبيون والمهندسون قد فكَّروا بالفعل في إقامة التجربة وتجميعها على سطح الأرض؛ فتشييد المكونات وتركيبها فوق سطح الأرض أيسر بكثير، كما أنه سريع نظرًا للمساحة الواسعة التي تسمح للعمل بالتوازي. اتسم هذا التشييد فوق سطح الأرض كذلك بميزة مهمة أخرى؛ أَلَا وهي أن مشكلات التجويف ما كانت لتؤخِّر عملية الإنشاء.

رغم ذلك — وكما قد تتصور — كان إنزال ذلك الجهاز الضخم إلى باطن الأرض أمرًا صعبًا للغاية، وقد سنحت لي فرصة التفكير في ذلك عند زيارتي للتجربة للمرة الأولى في عام ٢٠٠٧. وبالفعل، لم يكن إنزال الكاشف بالمهمة اليسيرة، فبدأ إنزال الجزء الأكبر منه إلى مسافة ١٠٠ متر في الحفرة بواسطة رافعة خاصة بسرعة منخفضة للغاية تبلغ ١٠ أمتار في الساعة، وبما أن المساحة الفاصلة بين التجربة وحوائط النفق لم تتجاوز ١٠ سنتيمترات، استلزم الأمر الهبوط ببطء ووجود نظام مراقبة دقيق. أُنزِلت خمس عشرة قطعة من الكاشف في الفترة ما بين نوفمبر ٢٠٠٦ ويناير ٢٠٠٨، وتم ذلك في

توقيت عصيب؛ إذ جاء إنزال آخِر قطعة مقارِبًا على نحو وشيك للتاريخ المحدَّد لبدء العمل في مصادم الهادرونات الكبير.

تلَتْ مشكلةَ المياه التي واجهتها تجربة اللولب المركب للميوونات أزمةٌ في تشييد جهاز مصادم الهادرونات الكبير نفسه، كان ذلك في يونيو عام ٢٠٠٤؛ إذ اكتُشِفَ آنذاك وجود مشكلات في خط توزيع الهليوم المعروف باسم «خط توزيع التبريد». توصَّلَ الباحثون في سيرن، الذين بحثوا في الأمر، إلى أن الشركة الفرنسية التي تولَّتْ ذلك المشروع الإنشائي قد استبدلت بالمادة المصمَّمة خصوصًا لذلك الغرض في التصميم الأصلي للمشروع ما وصفه لين بأنه «مُباعِد زهيد التكلفة»؛ فأصيبت تلك المادة البديلة بتشققات، مما سمح بحدوث انقباض حراري في الأنابيب الداخلية. ولم تكن تلك القطعة التالفة الوحيدة؛ ومن ثَمَّ لزم فحص جميع التوصيلات الأخرى.

بحلول ذلك الوقت، كان قد تَمَّ تركيب جزء من خط التبريد، إلى جانب إنتاج العديد من الأجزاء الأخرى بالفعل، ولتجنُّب عرقلة سلسلة التوريد، والتسبُّب في مزيد من التأخير، قرَّرَ المهندسون في سيرن إصلاح ما تمَّ إنتاجه بالفعل، وتكليف جهة التصنيع بحلِّ المشكلة قبل تسليم الأجزاء المتبقية. وقد أسفرت العمليات الصناعية بالمنظمة، والحاجة لتحريك الأجزاء الكبيرة للماكينة وإعادة تركيبها، عن تكبُّد مصادم الهادرونات الكبير تأخيرًا لمدة عام، لكن ذلك التأخير كان أقل بكثير من السنوات العشر التي خشي لين وآخَرون من أن يتعطَّل فيها العمل إذا ما تدخَّلَ المحامون في الأمر.

دون الأنابيب ونظام تبريد، ما كان من الممكن تركيب المغناطيسات؛ ومن ثَمَّ ظلَّتِ المغناطيساتُ البالغ عددها ألفًا في ساحة انتظار السيارات بسيرن. ورغم أن تلك الساحة ضمَّتْ في أحيان كثيرة أحدث سيارات المرسيدس والبي إم دابليو، فإن المغناطيسات التي بلغت قيمتها مليار دولار تجاوَزت على الأرجح صافي القيمة المعتادة لمحتويات تلك الساحة. ومع أنها لم تتعرض للسرقة، فإن ساحة انتظار سيارات لم تكن بالمكان الأمثل لتخزين المعدات التكنولوجية، وكان من الحتمي حدوث مزيد من التأخير نتيجةً للحاجة لتخزين المغناطيسات بما يتَّفِق مع المواصفات الأولية لها.

عام ٢٠٠٥ أوشكت أزمة أخرى على الحدوث. تعلَّقت تلك الأزمة بالمجموعة الثلاثية الداخلية المُصمَّمة في مختبر فيرميلاب في الولايات المتحدة واليابان. تعمل هذه المجموعة الثلاثية الداخلية على إحداث التركيز النهائي لحزم البروتونات قبل تصادمها، وتضم ثلاثة مغناطيسات رباعية الأقطاب مع توزيع للطاقة والتبريد، ومن هنا استمدت اسمها.

تعطلت هذه المجموعة الداخلية أثناء اختبارات الضغط، ورغم ما انطوى عليه هذا العطل من إحراج وتأخُّرٍ مزعجٍ، تمكَّنَ المهندسون من إصلاحه داخل النفق؛ ومن ثَمَّ لم يتسبَّب في قدر هائل من التأخير في نهاية الأمر.

بوجه عام، شهد عام ٢٠٠٥ قدرًا أكبر من النجاح مقارَنَةً بالعام السابق له. فافتُتِح تجويف تجربة اللولب المركب للميوونات في فبراير من ذلك العام، وإنْ لم يشهد الافتتاح موسيقى الأبواق الجبلية. ومن الأحداث المهمة كذلك التي شهدها شهر فبراير إنزالُ أول مغناطيس تبريد ثنائي القطب. وجدير بالذكر أن تشييد المغناطيسات كان له أهمية كبيرة في مشروع مصادم الهادرونات الكبير، وقد يسَّرَ التعاون الوثيق بين سيرن وجهاتِ التصنيع التجارية إنشاءَ تلك المغناطيسات في حينها وعلى نحو اقتصادي، فمع أن هذه المغناطيسات قد صُمِّمت في سيرن، فقد أنتجتها شركات في فرنسا وألمانيا وإيطاليا. في البداية، تقدَّمَ المهندسون والفيزيائيون والفنيون في سيرن بطلبٍ للحصول على ٣٠ مغناطيسًا ثنائي القطب في عام ٢٠٠٠، بهدف إخضاعها للفحص الدقيق لضمان جودتها ومراقبة تكلفتها قبل التقدُّم بالطلب النهائي للحصول على ما يزيد عن ١٠٠٠ مغناطيس في عام ٢٠٠٢. لكن سيرن حملت على عاتقها مسئولية توفير المواد الخام والمكونات الأساسية من أجل تحقيق أعلى مستوًى من الجودة والاتساق والحد من التكلفة. ولتحقيق تلك الغاية، نقلت المنظمة ١٢٠ ألف طن متري من المواد داخل أوروبا، مستخدمةً في ذلك ١٠ شاحنات كبيرة في المتوسط يوميًّا على مدار أربعة أعوام، ولم يكن ذلك سوى جانب واحد فقط من الجهود المبذولة في مشروع مصادم الهادرونات الكبير.

بعد توصيل المغناطيسات، خضعت جميعها للاختبار وتم إنزالها بعناية عبر العمود الرأسي إلى داخل النفق الموجود بالقرب من جبال جورا التي يطل عليها مقر سيرن، ومن هناك نقلتها مركبة خاصة إلى وجهتها النهائية عبر النفق. ونظرًا لضخامة تلك المغناطيسات وابتعاد جدران النفق عن تركيبات المصادم ببضع سنتيمترات فحسب، تم إرشاد تلك المركبة أوتوماتيكيًّا باستخدام خط مرسوم على الأرضية يُكشَف عنه بصريًّا. تحركت المركبة للأمام بمعدل لا يزيد عن ميل واحد في الساعة من أجل الحد من الاهتزازات؛ معنى ذلك أن نَقْلَ مغناطيس ثنائي القطب من نقطة الإنزال إلى الجهة المقابلة في الحلقة استغرَقَ سبع ساعات.

وفي عام ٢٠٠٦؛ أي بعد خمسة أعوام من الإنشاء، تمَّ توصيل آخِر المغناطيسات الثنائية القطب البالغ عددها ١٢٣٢ مغناطيسًا. وفي عام ٢٠٠٧، كان الحدث المهم وهو

إنزال آخِر مغناطيس تبريد ثنائي القطب، وإجراء أول عملية تبريد ناجحة لقطاع يبلغ طوله ٣٫٣ كيلومترات لتصل درجة حرارته إلى الدرجة المحدَّدة له وهي −٢٧١ درجة مئوية، ما سمح بتوصيل التيار الكهربي للجهاز بأكمله للمرة الأولى، ودوران عدة آلاف من وحدات الأمبير عبر المغناطيسات الفائقة التوصيل في ذلك القطاع من النفق. وكما جرت العادة في سيرن، تم الاحتفال بالحدث بشرب الشمبانيا.

أُغلِق قسم ترموستات الحرارة المنخفضة المستمر في نوفمبر ٢٠٠٧، وبدا كل شيء جاهزًا على أكمل وجه. بَيْدَ أن كارثة أخرى كادت تحدث، تضمَّنَتِ الكارثة تلك المرة ما يُعرَف باسم «وحدات الإعداد القابلة للتوصيل الكهربي». لم نكن نتابع كافة التقارير المتعلقة بمصادم الهادرونات الكبير في الولايات المتحدة، لكن أخبار هذه الكارثة الوشيكة وصلت إلينا، وقد أخبرني أحد الزملاء العاملين في سيرن بالمخاوف التي تتعلَّق بتعطُّل هذه القطعة، فضلًا عما يمكن أن ينتج عن ذلك من مشكلات في جميع أرجاء الحلقة.

تمثَّلَتِ المشكلة في الفارق البالغ نحو ٣٠٠ درجة بين درجة حرارة مصادم الهادرونات الكبير في درجة حرارة الغرفة ودرجة حرارته بعد تبريده عند تشغيله؛ فلهذا الفارق تأثير هائل على المواد المُصنَّع منها المصادم؛ إذ تنكمش الأجزاء المعدنية بالبرودة وتتمدد بالحرارة، والمغناطيسات الثنائية القطب نفسها تنكمش بضعة سنتيمترات أثناء عملية التبريد. قد لا يبدو ذلك قدرًا كبيرًا بالنسبة لجسم يبلغ طوله ١٥ مترًا، لكن البكر يجب وضعه في حدود دقة تبلغ عُشْر المِّليمتر للحفاظ على المجال المغناطيسي المتناسق القوي اللازم لتوجيه حُزَم البروتونات على النحو الملائم.

ومن ثَمَّ، لتكييف الجهاز مع هذا التغيُّر، زُوِّدَتِ المغناطيسات الثنائية القطب بأصابع خاصة تمتد للخارج من أجل ضمان استمرار الكهرباء عند تبريد الماكينة، وتنزلق إلى مكانها ثانيةً عند ارتفاع الحرارة. لكن بسبب بعض مسامير البرشام المعيبة، سقطت تلك الأصابع بدلًا من أن ترتد إلى مكانها. الأسوأ من ذلك هو أن كل الوصلات البينية كانت عرضةً لهذا العطل، ولم يكن من الواضح أيها به مشكلة؛ ومن هنا كان التحدي في التعرف على كل مسامير البرشام المعيبة وإصلاحها، دون التسبُّب في قدر هائل من التأخير.

تجدر الإشادة هنا ببراعة المهندسين في سيرن؛ إذ توصَّلوا إلى وسيلة بسيطة لاستغلال اللاقط الكهربي الموجود على بُعْدِ كلِّ ٥٣ مترًا بطول الحزمة، والذي تم تركيبه في البداية بهدف حثِّ الأجهزة الإلكترونية بواسطة مرور الحزم. ركَّبَ المهندسون جهازَ ذبذبةٍ

في جسم بحجم كرة الطاولة، يمكن إرساله عبر النفق على طول المسار الذي ستسلكه الحزم. بلغ طول كل قطاع ثلاثة كيلومترات، وكان بإمكان تلك الكرة الاندفاع داخل هذه القطاعات لتحثَّ الأجهزة الإلكترونية في كل مرة تمر بها على أحد اللاقطات الكهربية. حينئذٍ، يمكن للمهندسين التدخُّل وإصلاح المشكلة دون الاضطرار لفتح كل وصلة بينية على طول مسار الإشعاع. وقد تندَّرَ أحد الفيزيائيين في مصادم الهادرونات الكبير على ذلك الأمر قائلًا إن التصادمات الأولى بالمصادم لم تكن بين البروتونات، وإنما بين كرة طاولة وأصبع منهارة.

بعد ذلك الحل الأخير، بدا المصادم جاهزًا للعمل، وما إن تَمَّ تركيب جميع الأجهزة به حتى صار من الممكن بدء تشغيله. وفي عام ٢٠٠٨، تعالَتْ دعوات الكثيرين مع إجراء أول اختبار لتشغيل المصادم بعد انتظارٍ دَامَ طويلًا.

سبتمبر ٢٠٠٨: الاختبارات الأولى

يكوِّن مصادم الهادرونات الكبير حُزَمًا من البروتونات، وبعد سلسلة من تعزيزات الطاقة، يدفع المصادم بهذه الحُزَم إلى داخل المعجِّل الحلقي النهائي. بعد ذلك، يرسل هذه الحزم بأرجاء النفق لتعود إلى وضعها الأولي بالضبط، ما يسمح للبروتونات بالدوران عدة مرات قبل أن تنحرف على فترات منتظمة لتتصادم بقدر عالٍ من الكفاءة. كل خطوة من هذه الخطوات تتطلب اختبارها على حدة.

تمثَّلَ الاختبار الأول الأساسي في التحقُّق مما إذا كانت الحزم ستدور بالفعل داخل الحلقة أم لا، وهو ما تأكَّدَتْ إمكانيته بالفعل. فبعد تاريخ طويل من التجارب والمحن، أطلقت سيرن في سبتمبر ٢٠٠٨ أول حزمتَيْ بروتونات في المصادم، ولم تواجِه في ذلك سوى أقل قدر من المشكلات؛ ما أدَّى إلى نتائج فاقَتْ كافة التوقعات. في ذلك اليوم، ولأول مرة، عبرت حزمتَا البروتونات بالتتابع النفقَ الضخمَ في اتجاهين متقابلين. تضمنت تلك الخطوة الواحدة إعدادَ عناصر الحقن، وبدْءَ تشغيل عناصر التحكم والمعدات، والتأكد من أن المجال المغناطيسي يمكنه الحفاظ على البروتونات داخل الحلقة، وأن جميع المغناطيسات تعمل وفق المواصفات ويمكنها العمل على نحو متزامن. وشهد مساء يوم التاسع من سبتمبر المرة الأولى التي تكون فيها هذه السلسلةُ من الأحداث جاهزةً للتطبيق، وقد عمل كل شيء كما هو مخطَّط له — بل أفضل — عند إجراء الاختبارات في اليوم التالي.

وصف جميع مَن عملوا في مصادم الهادرونات الكبير يوم العاشر من سبتمبر عام ٢٠٠٨ بأنه يوم لا يُنسَى. وعند زيارتي للمكان بعد شهر من ذلك التاريخ، سمعت قصصًا عديدة عن السعادة الغامرة التي شهدها ذلك اليوم. تتبَّعَ الناس آنَذاك مسارَ نقطتين من الضوء على شاشة الكمبيوتر بحماس منقطع النظير؛ نجحت الحزمة الأولى في العودة إلى دورتها الأولى، وسلكت — مع انحراف طفيف — المسار ذاته الذي كان من المخطَّط أن تسلكه في خلال الساعة الأولى من انطلاقها. دارت الحزمة في بادئ الأمر حول الحلقة لبضع دورات، ثم خضعت كل دفعة متتالية من البروتونات لتعديل بسيط عمل على دوران الحزمة سريعًا مئات المرات. بعد ذلك بفترة وجيزة، فعلت الحزمة الثانية نفس الأمر، مستغرقةً نحو ساعة ونصف لتتبع مسارها السليم بالضبط.

بلغ لين من السعادة ما جعله لا يعلم شيئًا بشأن البث الحي آنذاك لما يحدث من غرفة التحكم، حيث كان المهندسون يتابعون المشروع، عبر شبكة الإنترنت حيث أُذِيعت الأحداث ليتسنَّى لأي شخص متابعتها. شاهَدَ الكثير من الناس هاتين النقطتين على شاشات أجهزتهم، حتى إن المواقع اضطرت للإغلاق لتجاوزها أقصى سعة لها. جلس الناس بجميع أنحاء أوروبا — بلغ عددهم مليونَيْ نسمة وفق تقارير المكتب الصحفي بسيرن — متسمِّرين أمام الشاشات بينما كان المهندسون يعدلون مسار البروتونات لتمكينها من الدوران بنجاح حول المحيط الكامل للحلقة. وفي تلك الأثناء، ملأت الإثارة أرجاءَ سيرن، إذ تجمَّعَ الفيزيائيون والمهندسون في القاعات لمشاهدة الحدث ذاته، في تلك اللحظات بدت التطلُّعات المتعلقة بمصادم الهادرونات الكبير واعدةً للغاية. كان اليوم ناجحًا على نحو مذهل.

لكن بعد تسعة أيام فقط، تحوَّلَتْ تلك السعادة الغامرة إلى إحباط. كان من المفترض اختبارُ ميزتين جديدتين مهمتين آنذاك. لزم، أولًا، تعجيل الحزم داخل حلقة المصادم لتصل إلى مستوًى أعلى من الطاقة مقارَنَةً بحالها في الاختبار الأول الذي لم يستخدم سوى طاقةِ حقن الحزم التي حملتها البروتونات عند دخولها للمرة الأولى في حلقة المصادم. أما الجزء الثاني من الخطة، فتمثَّلَ في مصادمة هذه الحزم، وهي الخطوة التي مثَّلَتْ بالطبع نقطةً مهمَّةً للغاية في تطوُّر المصادم.

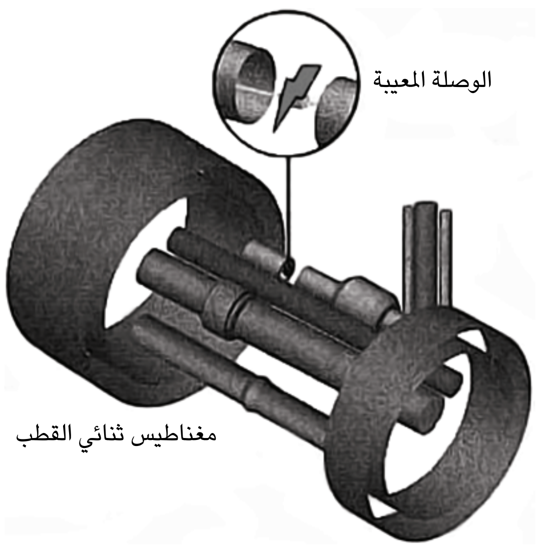
لكن في اللحظة الأخيرة يوم ١٩ سبتمبر، ورغم ما اتبعه المهندسون من اعتبارات واحتياطات عديدة، فشل الاختبار، وعند تنفيذه جاءت نتائجه كارثيةً؛ فقد أسفَرَ خطأٌ بسيطٌ في لحام الغطاء النحاسي الخارجي، الذي يصل بين اثنين من المغناطيسات المتصلة

بعدد قليل للغاية من صمامات إطلاق الهليوم العاملة، في تأخُّرٍ دَامَ عامًا كاملًا قبل التمكُّنِ أخيرًا من إجراء أول مصادمة بين البروتونات.

تمثَّلَتِ المشكلة في أنه عندما حاول العلماء رفع قوة التيار والطاقة بالقطاع الثامن والأخير، انكسر المفصل الذي يربط بين مغناطيسين بقضيب التجميع. و«قضيب التجميع» هو وصلة فائقة التوصيل تربط بين زوج من المغناطيسات الفائقة التوصيل (انظر الشكل ٩-١). وكان المتسبِّب في ذلك هو الوصلة التي تحمل المفصل بين المغناطيسين، وتسبَّبَ الاتصالُ المعيب في حدوث قوس كهربائي أدَّى بدوره إلى ثَقْب حاوي الهليوم وتسرُّب ستة أطنان مترية من الهليوم السائل فجأةً، وهو السائل الذي من المفترض أن يتم تسخينه ببطء. وفُقِدت الموصلية الفائقة نتيجةً للإخماد الذي حدث عند ارتفاع درجة حرارة الهليوم السائل وتحوُّله إلى غاز.

تسبَّبَتِ الكميةُ الضخمة من الهليوم المتسرِّب في موجة انضغاطية هائلةٍ نتج عنها انفجارٌ، وفي أقل من ٣٠ ثانية، أسفرت الطاقة الناتجة عن هذا الانفجار عن إزاحة بعض المغناطيسات عن أماكنها وتدمير الفراغ داخل أنبوب الحزم، وإتلاف العزل، وتلويث ٢٠٠٠ قدم من أنبوب الحزم بالسخام. تحطَّمَ إثر ذلك عشرة مغناطيسات ثنائية القطب بالكامل، في حين تعرَّضَ ٢٩ مغناطيسًا آخَر لتلفيات استلزمت استبدالها. وغني عن القول أن ذلك لم يكن ما نطمح في حدوثه، ولم يكن أحدٌ بغُرَف التحكُّم على علم بما يحدث حتى لاحَظَ أحدهم تشغيل أحد أزرار الإيقاف في النفق بأحد أجهزة الكمبيوتر بسبب الهليوم المتسرب، وبعد ذلك بفترة وجيزة، أدركوا فقدانهم للحزمة.

علمتُ بهذه التفاصيل أثناء زيارتي للمنظمة الأوروبية بعد ذلك الحادث المؤسف ببضعة أسابيع. يجدر التذكُّر هنا أن الهدف النهائي للتصادمات هو مركز طاقة كلية تبلغ شدته ١٤ تيرا إلكترون فولت، لكن اتُّخِذَ قرار بتخفيض الطاقة إلى نحو ٢ تيرا إلكترون فولت فقط للتشغيل الأول، من أجل ضمان سَيْر كلِّ شيء على النحو الصحيح. وفيما بعد، خطَّط المهندسون لزيادة الطاقة لتصل إلى ١٠ تيرا إلكترون فولت (أي ٥ تيرا إلكترون فولت لكل حزمة) لعمليات تسجيل البيانات الأولى.



شكل ٩-١: تهدف قضبان التجميع للربط بين المغناطيسات المختلفة. وقد تسبَّبَ لحام معيب في أحد هذه القضبان في الحادث المؤسِف الذي وقع عام ٢٠٠٨.

لكن الخطة صارت أكثر طموحًا بعد التأخُّر البسيط الناتج عن تعطُّل أحد المحولات يوم ١٢ سبتمبر، فواصَلَ العلماء اختبار قطاعات النفق الثمانية بطاقة وصلت إلى ٥,٥ تيرا إلكترون فولت أثناء الفترة الزمنية التي وفَّرَها هذا التأخُّر البسيط. وتوفَّرَ لديهم ما لزم من الوقت لاختبار سبعة من بين هذه القطاعات الثمانية، فتأكَّدوا من أن هذه القطاعات قادرة على العمل على نحو سليم بطاقة أعلى، لكن لم تسنح لهم الفرصة لاختبار القطاع الثامن، ومع ذلك قرَّروا المضي قُدُمًا ومحاولة إجراء التصادمات بطاقات أعلى؛ نظرًا لأنه لم يبد أن هناك أي مشكلة.

سار كل شيء على ما يرام إلى أن حاوَلَ المهندسون رفع مستوى الطاقة بالقطاع الأخير الذي لم يخضع للاختبار. ووقع الحادث المُعطِّل عندما ارتفعت الطاقة من نحو ٤ إلى ٥,٥ تيرا إلكترون فولت، الأمر الذي تطلَّبَ تيارًا كهربيًّا تتراوح شدته ما بين ٧٠٠٠

و٩٣٠٠ أمبير، وكانت تلك اللحظة الأخيرة التي يمكن أن يقع فيها أي خطأ، وقد وقع بالفعل.

خلال العام الذي تأخَّرَ فيه المشروع، تم إصلاح كل شيء بتكلفة بلغت حوالي ٤٠ مليون دولار، ورغم أن إصلاح المغناطيسات والإشعاع استغرَقَ وقتًا، فلم يكن ذلك بالمهمة المستحيلة؛ إذ توفَّرَ ما يكفي من المغناطيسات الاحتياطية التي يمكن إحلالها محلَّ المغناطيسات الثنائية القطب التي تعذَّرَ إصلاحها، والبالغ عددها ٣٩ مغناطيسًا. وإجمالًا، تم استبدال ٥٣ مغناطيسًا (١٤ مغناطيسًا رباعي الأقطاب، و٣٩ مغناطيسًا ثنائي القطب) في قطاع النفق الذي تعرَّض للحادث. بالإضافة إلى ذلك، تم تنظيف ما يزيد عن أربعة كيلومترات من أنبوب الحزم المفرَّغ، وتركيب نظام مقيد جديد لمائة مغناطيس رباعي الأقطاب، وإضافة ٩٠٠ منفذ جديد لتسريب ضغط الهليوم. هذا إلى جانب إضافة ٦٥٠٠ كاشف جديد إلى نظام حماية المغناطيسات.

تمثَّلَ الخطر الأكبر في وجود ١٠ آلاف مفصل بين المغناطيسات، وهي المفاصل التي كان من الممكن أن تتسبَّبَ في نفس المشكلة. تم تحديد الخطر، لكن كيف يمكن لأحد الوثوق في أن هذه المشكلة لن تعاود الظهور في بقعة أخرى بالحلقة؟ تطلَّبَ الأمرُ آلياتٍ للكشف عن أي مشكلة مماثلة قبل أن تُسفِر عن أي أضرار. وأثبت المهندسون أنهم على قدر المسئولية مجدَّدًا؛ فالنظام الذي حدَّثوه صار يبحث الآن عن حالات الانخفاض البسيطة في الجهد الكهربي التي من شأنها الإشارة إلى وجود مفاصل مقاوِمة، الأمر الذي يشير بدوره إلى وجود صدع في النظام المُغلَق الذي يضمُّ المُبرِّدات التي تحافِظ على برودة الماكينة. استلزم الحذر، كذلك، بعض التأخيرات من أجل تحسين نظام صمامات تسريب الهليوم وإجراء مزيد من الفحوصات للمفاصل والأغطية النحاسية للمغناطيسات نفسها، وهي العناصر التي يمكن أن تتسبَّبَ في تأخُّر الوصول إلى أعلى مستويات الطاقة التي صُمِّم مصادم الهادرونات الكبير للعمل عندها. لكن في ظل جميع الأنظمة الجديدة التي تعمل على مراقبة مصادم الهادرونات الكبير وتحقيق الاستقرار له، كان لين وآخَرون غيره على ثقةٍ بأن حالات ارتفاع الضغط، التي تسبَّبَتْ في التلف سيتم تفاديها.

لقد حالفنا الحظ، إلى حدٍّ ما، عندما تمكَّنَ الفيزيائيون والمهندسون من إصلاح الأعطال قبل بدء العمليات الفعلية وإطلاق الحزم في التجارب. كلَّفَ الانفجار مصادم الهادرونات الكبير عامًا من التأخير قبل التمكُّن من بدء اختبار الحزم ومحاولة إجراء التصادمات مجدَّدًا. العامُ فترةٌ زمنيةٌ طويلةٌ، لكنها ليست طويلة للغاية في حال

كان الهدف هو التوصُّل إلى النظرية الأساسية للمادة التي عكفنا على دراستها على مدى الأربعين عامًا الأخيرة، بل على مدى آلاف الأعوام إذا نظرنا للأمر من نواحٍ عدة.

لكن في يوم ٢١ أكتوبر من عام ٢٠٠٨، التزمت إدارة سيرن بجزء من خطتها الأولية. ففي ذلك اليوم، انضممتُ إلى ١٥٠٠ فيزيائي وقائد عالمي خارجَ جنيف للاحتفال بالتدشين الرسمي لمصادم الهادرونات الكبير، وهو الاحتفال الذي أُعِدَّ له مقدَّمًا استبشارًا بنجاح المشروع، قبل أن يتوقَّعَ أحدٌ الأحداثَ الكارثية التي وقعت قبل ذلك التاريخ ببضعة أسابيع. حَفِلَ اليوم بالخُطَب والموسيقى، فضلًا عن الطعام الشهي الذي يمثِّل عنصرًا مهمًّا في أي حدث ثقافي أوروبي. كان الاحتفال ممتعًا وتثقيفيًّا، رغم توقيته السابق لأوانه، وبالرغم من القلق بشأن حادث شهر سبتمبر، ملأ الأملُ نفوسَ الجميع بأن هذه التجارب ستُلقِي الضوء على بعض الألغاز المتعلقة بالمادة، وضعف الجاذبية، والمادة المظلمة، وقوى الطبيعة.

رغم عدم رضى العلماء بسيرن عن التوقيت غير الموفَّق للاحتفال، فقد كان في نظري أشبه باستبصار لنجاح هذا التعاون الدولي. لم يكن هدف فعاليات الحدث تكريم الاكتشافات، وإنما تقدير إمكانات مصادم الهادرونات الكبير وحماس الدول العديدة المشاركة في إنشائه. وكانت بعض الخُطَب مشجِّعة ومُلهِمةً حقًّا، فتحدَّثَ رئيس الوزراء الفرنسي، فرانسوا فيون، عن أهمية البحث الأساسي، وكيف أن الأزمة المالية العالمية ينبغي ألَّا تعرقِل التقدُّم العلمي. أما الرئيس السويسري، باسكال كوشيبين، فتحدَّثَ عن فضل الخدمة العامة، في حين تحدَّثَ وزير العلوم والتكنولوجيا والتعليم العالي بالبرتغال، البروفيسور خوسيه ماريانو جاجو، عن ضرورة تقديم العلم على البيروقراطية، وأهمية الاستقرار لإقامة المشروعات العلمية المهمة. كان العديد من الشركاء الأجانب يزورون سيرن للمرة الأولى من أجل الاحتفال بيوم التدشين، والشخص الذي كان يجلس بجواري في الاحتفال كان يعمل في الاتحاد الأوروبي بجنيف، لكنه لم تَطَأْ قدمُه قطُّ مقرَّ المنظمة من قبلُ، وبعد أن شاهَدَها، أخبرني — والحماس يملؤه — بأنه ينوي العودة لزيارتها مجدَّدًا مصطحِبًا زملاءه وأصدقاءه.

نوفمبر ٢٠٠٩: النجاح أخيرًا

عاد مصادم الهادرونات الكبير للعمل أخيرًا يوم ٢٠ نوفمبر عام ٢٠٠٩، وفي هذه المرة حقَّقَ نجاحًا مذهلًا. فلم تدر حزم البروتونات للمرة الأولى منذ عام فحسب، وإنما حقَّقَتْ تصادمًا أيضًا بعد بضعة أيام لتصدر وابلًا من الجسيمات التي دخلت بعد ذلك إلى التجارب. وصف لين بحماس كيف أن المصادم عمل على نحو أفضل مما توقَّعَه، وهي الملاحظة التي رأيتها مشجِّعة، لكنها غريبة بعض الشيء في الوقت نفسه؛ لأنه من المفترض أن لين كان مسئولًا عن جعل المصادم يحقِّق أكبر قدر ممكن من النجاح.

ما لم أفهمه آنذاك هو مدى سرعة عمل جميع الأجزاء على النحو الصحيح مقارَنَةً بما هو متوقَّعٌ استنادًا إلى الخبرات السابقة مع المعجلات الأخرى. فسَّرَ لي ماوريتسيو بيريني — وهو عالم تجارب إيطالي شابٌّ شارك في تجربة اللولب المركب للميوونات — ما كان يقصده لين؛ فأوضح لي أن الاختبارات، التي استغرقت ٢٥ يومًا في فترة الثمانينيات وأُجرِيت على حزم الإلكترونات والبوزيترونات بمصادم الإلكترونات-البوزيترونات الكبير في النفق نفسه، قد تمَّتِ الآنَ في أقل من أسبوع، وحزم البروتونات مستقرة وتتبع ما هو مخطَّط لها بالضبط. ظلَّتِ البروتونات في الخط الخاص بها، ولم يُكشَف إلا عن انحراف عدد قليل منها فقط. نجحت المعدات البصرية في عملها، وكذلك اختبارات الثبات، وعمليات إعادة ضبط المحاذاة، وتماشَتِ الحُزَم الفعلية بدقةٍ مع برامج الكمبيوتر التي حاكَتْ ما يُفتَرَض أن يحدث.

في الواقع، فُوجِئَ الفيزيائيون التجريبيون عندما أُبلِغوا يوم الأحد في الساعة الخامسة مساءً — أي بعد يومين فحسب من بدء دوران الحزم المُحدَّثَة — بأن يتوقَّعوا حدوث التصادمات في اليوم التالي؛ فقد توقَّعوا أن الفترة الزمنية بين أول عملية إطلاق للحُزَم بعد الإغلاق والتصادمات الفعلية التي يمكنهم تسجيلها وقياسها ستطول عن ذلك. كانت تلك الفرصة الأولى التي سنحت لهم لاختبار تجربتهم باستخدام حزم بروتونات حقيقية، بدلًا من الأشعة الكونية التي استخدموها أثناء انتظارهم لتشغيل الجهاز، لكن ذلك الإخطار السريع بحدوث التصادمات عنى أن الوقت المتاح أمامهم ضيِّق للغاية من أجل إعادة تهيئة «الإشارات» التي تحدِّد لأجهزة الكمبيوتر التصادماتِ التي عليها تسجيلها. وصف لي ماوريتسيو ما انتابهم من توترٍ نظرًا لعدم رغبتهم في إفساد هذه الفرصة بأي

تصرُّف أحمق. ففي مصادم تيفاترون، فسَدَ الاختبار الأول نتيجة لحدوث رنين مؤسف بدوران الحزم في نظام القراءة. لم يرغب أحدٌ في مشاهدة ذلك يحدث مجدَّدًا. صاحَبَ هذا القلق، بالطبع، قدرٌ هائلٌ من الإثارة لدى كلِّ مَن همَّه الأمر.

أخيرًا، أُجرِي يوم ٢٣ نوفمبر أول تصادم في مصادم الهادرونات الكبير. تصادَمَتِ الملايين من البروتونات بطاقة حقن ٩٠٠ جيجا إلكترون فولت. معنى ذلك أنه بعد سنوات من الانتظار، صار من الممكن للتجارب جَمْعُ البيانات؛ أي تسجيل نتائج تصادمات البروتونات الأولى في حلقة مصادم الهادرونات الكبير. فنجد، مثلًا، العلماءَ بتجربة تصادم الأيونات الكبيرة — وهي إحدى التجارب الأصغر حجمًا في المصادم — قد قدَّمُوا مطبوعًا مبدئيًّا (بحثًا لم يُنشَر بعدُ) بهذه البيانات يوم ٢٨ نوفمبر.

لم تمر فترة طويلة حتى جرى تعجيل بسيط لإنتاج حزم بروتونات بشدة ١٫١٨ تيرا إلكترون فولت، وهي الحزم الدوَّارة الأعلى على الإطلاق في مستوى الطاقة، وبعد أسبوع واحد من أولى تصادمات مصادم الهادرونات الكبير، يوم ٣٠ نوفمبر، وقع التصادم بين هذه البروتونات ذات المستوى الأعلى من الطاقة، وتجاوز صافي مركز الطاقة الإجمالية البالغ شدته ٢٫٣٦ تيرا إلكترون فولت أعلى مستويات الطاقة التي سبق الوصول إليها من قبلُ، محطِّمًا بذلك الرقم القياسي لمختبر فيرميلاب الذي ظلَّ محتفظًا به على مدى ثمانية أعوام.

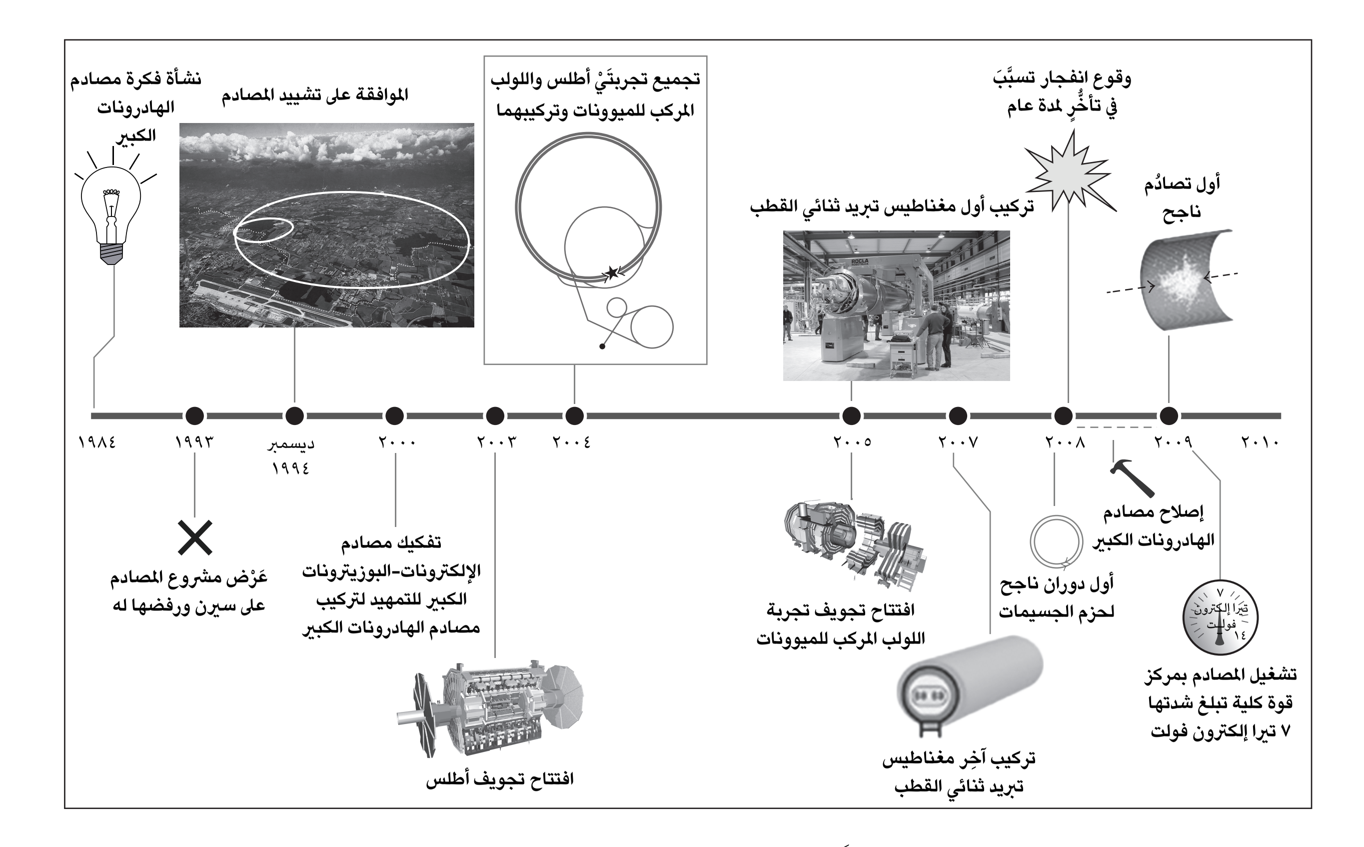
سجَّلت ثلاثُ تجارِب بمصادم الهادرونات الكبير تصادمات بين الحُزَم، ووقعت عشرات الآلاف من هذه التصادمات على مدى الأسابيع القليلة التالية. لم تُستخدَم هذه التصادمات في اكتشاف نظريات فيزيائية جديدة، لكنها أفادت كثيرًا في الجزم بأن التجارب قد نجحت بالفعل، ويمكن استخدامها في دراسة خلفية النموذج القياسي؛ أي الأحداث التي لا تشير إلى أي شيء جديد، لكنها قد تتداخل مع الاكتشافات الفعلية.

شعر الفيزيائيون التجريبيون في جميع أنحاء العالم بالرضى عمَّا وصل إليه مصادم الهادرونات الكبير من مستويات غير مسبوقة من الطاقة. وجدير بالذكر أن المصادم قد حقَّق ذلك في وقت عصيب، فكان من المفترض إغلاق الجهاز من منتصف ديسمبر حتى مارس من العام التالي؛ ومن ثَمَّ كان لا بد لذلك أن يحدث في ديسمبر أو يتأخَّر عدة أشهر أخرى. وقد عبَّر جيف ريتشمان — وهو عالم تجارب من مدينة سانتا باربرا يعمل في المصادم — عن هذه الحقيقة بسعادة في مؤتمر حول المادة المظلمة كنتُ أحضره معه؛ إذ

كان قد تراهَنَ مع أحد الفيزيائيين بمختبر فيرميلاب على أن المصادِم سيحقِّق تصادمات بمستويات من الطاقة أعلى من مصادم تيفاترون قبل نهاية عام ٢٠٠٩، وقد عكسَتْ سعادته أيهما فاز بالرهان.

توقَّفَ هذا التشويق مؤقَّتًا يوم ١٨ ديسمبر ٢٠٠٩ عندما أُغلِق مصادم الهادرونات الكبير بعد هذا التشغيل التمهيدي. اختتم لين إيفانز حديثَه بمناقشة خطط عام ٢٠١٠، إذ وعَدَ بزيادة كبيرة في الطاقة. هدفت الخطة للوصول إلى ٧ تيرا إلكترون فولت قبل نهاية العام، وهي زيادة مذهلة غير مسبوقة. كان لين شديد التَّحمس والثقة، وكان له الحق في ذلك خاصةً بعد أن عاد الجهاز للعمل بهذه الطاقة العالية؛ فبعد العديد من النجاحات والإخفاقات، صار المصادم يعمل أخيرًا وفقًا للمخطَّط الذي وُضِع له (انظر الشكل ٩-٢ للاطلاع على مخطط زمني مختصر). ومن المفترض أن يواصِل المصادِم عملَه طوال عام ٢٠١٢ بطاقة ٧ تيرا إلكترون فولت، أو ربما أكثر من ذلك، قبل إغلاقه مدة عام على الأقل من أجل إعداده لزيادة الطاقة إلى أقرب مستوًى ممكن من الهدف الذي من المفترض أن يحقِّقه المصادم، وهو ١٤ تيرا إلكترون فولت. وأثناء هذه الفترة وما يليها من دورات التشغيل، سيحاول المصادِمُ كذلك رَفْعَ كثافة الحزم لزيادة عدد التصادمات.

وفي ظل سلاسة عمل التجارب والماكينات بعد إعادة التشغيل عام ٢٠٠٩، اختتم لين خطابه بكلمات راقت لمستمعيه، إذ قال: «الآن، وبعد أن انتهينا من مغامرة إنشاء مصادم الهادرونات الكبير، سنبدأ في خوض مغامرة الاكتشاف.»



شكل ٩-٢: مخطَّط زمني مختصر لتاريخ مصادم الهادرونات الكبير.

الفصل العاشر

ثقوب سوداء تبتلع العالم

تطلَّعَ الفيزيائيون طويلًا لبدء تشغيل مصادم الهادرونات الكبير؛ إذ تلعب البيانات دورًا مهمًّا في التقدُّم العلمي، واشتدَّ تَوْقُ فيزيائيي الجسيمات سنواتٍ طوالًا للحصول على بيانات حول الطاقة العالية، وإلى أن يقدِّم المصادِم هذه الإجابات، لا يمكن لأحدٍ معرفةُ أيٍّ اقتراح من الاقتراحات العديدة التي قد ينطوي عليها النموذج القياسي هو الصحيح. لكن قبل استكشاف هذا الكتاب لعدد من الاحتمالات الأكثر تشويقًا، سوف نتوقَّف قليلًا في الفصول القليلة التالية مع بعض الأسئلة المهمة بشأن المخاطر والشكوك التي تلعب دورًا مهمًّا في فهم كيفية تفسير الدراسات التجريبية بالمصادم، وفي العديد من القضايا ذات الصلة في العالم المعاصر. وسوف نبدأ رحلتنا بموضوع الثقوب السوداء في مصادم الهادرونات الكبير، وكيف أن هذه الثقوب ربما نالت اهتمامًا أكثر مما تستحق.

السؤال

ينظر الفيزيائيون حاليًّا في اقتراحات عدة بشأن ما يمكن لمصادِم الهادرونات الكبير التوصُّل إليه في النهاية. في التسعينيات، تحمَّسَ الفيزيائيون النظريون والفيزيائيون التجريبيون في البداية بشأن فئة مميزة من السيناريوهات المُحدَّدة مؤخرًا، والتي لا تخضع فيها للتعديل فيزياءُ الجسيمات فحسب، وإنما الجاذبية نفسها، ومن شأنها إنتاج ظواهر جديدة في ظلِّ طاقات مصادم الهادرونات الكبير. حظيت إحدى النتائج المحتملة المثيرة لهذه التجارب بقدر كبير من الاهتمام، لا سيما ممَّنْ هُمْ خارجَ مجال الفيزياء. تمثَّلَتْ هذه النتيجة في احتمال تكوُّن ثقوب سوداء مجهرية ذات طاقة منخفضة، وهذه الثقوب السوداء الدقيقة ذات الأبعاد الإضافية قد تتكوَّن بالفعل إذا ثبُتَ أن الأفكار

المتعلِّقة بأبعاد المكان الإضافية — مثل تلك التي اقترحتُها أنا ورامانساندرم — حقيقية. تنبَّأَ الفيزيائيون على نحو متفائل بأن هذه الثقوب السوداء — في حال تكوُّنها — سوف تُثبِت صحةَ هذه الأفكار المتعلِّقة بالجاذبية المُعدَّلة.

جديرٌ بالذكر هنا أنه لم يكن الجميع متحمِّسًا بشأن هذا الاحتمال؛ فالبعض في الولايات المتحدة وغيرها انتابهم القلق بشأن احتمال ابتلاع الثقوب السوداء، التي من المحتمل تكوُّنها، لكلِّ شيء على سطح الأرض. وقد طُرِحَتْ عليَّ كثيرًا أسئلةٌ بشأن هذا السيناريو المحتمَل بعد إلقائي للمحاضرات العامة، وسُرَّ أغلبُ مَن طرحوا تلك الأسئلة عندما فسَّرْتُ لهم عدم وجود أي خطر. لكن، لسوء الحظ، لم تسنح الفرصة للجميع بمعرفة القصةِ كاملةً.

كان من بين أكثر مثيري الذعر تحمُّسًا والتر واجنر، وهو مدرس للمرحلة الثانوية، ومدير حديقة نباتات في هاواي، ومحامٍ سبَقَ له العمل كمسئولِ أمنٍ نوويٍّ؛ والإسباني لويس سانشو، وهو مؤلِّف وباحث — على حدِّ وصفه — في النظرية الزمنية. وصل الحال بهذين الاثنين إلى التقدُّم بدعوى قضائية في هاواي ضد سيرن، ووزارة الطاقة الأمريكية، ومؤسَّسة العلوم الوطنية الأمريكية، ومركز المعجِّل الأمريكي فيرميلاب، من أجل منع تشغيل مصادم الهادرونات الكبير من العمل. لو كان الهدف هو ببساطة تأخير عمل المصادم، لكان إرسال حمامة لإلقاء فتات خبز على المصادم لإعاقة عمله أيسر بكثير (حدث هذا بالفعل، إلا أن الحمامة لم تكن مبعوثة من أحد). لكن واجنر وسانشو أرادَا إيقاف المصادم قبل أن يعمل وبشكل دائم، فأخَذَا يمارسان الضغوط في هذا الشأن.

لم يقتصر القلق بشأن أزمة الثقوب السوداء على واجنر وسانشو فحسب؛ فثمة كتابٌ ألَّفه محامٍ متخصِّص في قضايا المصلحة العامة، وهو هاري ليمان، يبدو أنه يلخِّص المخاوف في هذا الشأن تلخيصًا دقيقًا. كان ذلك الكتاب بعنوان «فيزياء الكم تهدِّد بنهاية العالم: مَن يحِقُّ له تقرير ما إذا كان مصادم الهادرونات الكبير يستحق المجازفة بكوكبنا أم لا؟» وقد انصبَّ تركيز إحدى المدونات التي أُنشِئَتْ حول هذا الكتاب على المخاوف المتعلقة بانفجار سبتمبر ٢٠٠٨، وتساءلت ما إذا كان المصادم يمكنه البدء بأمان مجدَّدًا أم لا. لكن الخوف الأساسي لم يتعلَّقْ بفشل التكنولوجيا المسئولة عن الحادث المؤسف الذي وقع يوم ١٩ سبتمبر، وإنما بالظواهر المادية الفعلية التي يمكن لمصادم الهادرونات الكبير التسبُّب فيها.

تمحورت التهديدات المزعومة، التي وصفها ليمان وغيره كثيرون بشأن «آلة يوم القيامة»، حول الثقوب السوداء التي أشاروا إلى أنها يمكن أن تؤدِّي إلى انفجار كوكب الأرض داخليًّا. كان القلق يساورهم بشأن نقص التقييم الموثوق للمخاطر في ضوء الاعتماد على ميكانيكا الكم في دراسة مجموعة تقييم أمان مصادم الهادرونات الكبير — مع الوضع في الاعتبار ادعاءات ريتشارد فاينمان وآخَرين بأن «لا أحدَ يفهم ميكانيكا الكم» — بالإضافة إلى الشكوك الناجمة عن الكثير من الأمور المجهولة في نظرية الأوتار، وهي النظرية التي رأى هؤلاء المتخوفون أنها ذات صلة بهذا الموضوع. تضمَّنَتْ أسئلتهم ما إذا كان مقبولًا المخاطرة بكوكب الأرض لأي سبب كان — حتى إن كانت المخاطر المقترحة ضئيلة للغاية — ومَن عليه تحمُّل مسئولية اتخاذ القرار في هذا الشأن.

رغم أن التدمير الآني لكوكب الأرض من المخاوف المرتبطة بشكل أكبر بالتفكير في نهاية العالم، فإن الأسئلة التي طُرِحَتْ مؤخرًا بشأن مخاوف أخرى أكثر ملاءمةً في الواقع لمناقشتها، مثل تلك المتعلقة بظاهرة الاحتباس الحراري العالمي. وآمل أن يتمكَّنَ هذا الفصل والفصل التالي من أن يقنعك بأنه ينبغي القلق بشأن تخفيض قيمة بنود خطة التقاعد الخاصة بك أكثر من قلقك بشأن اختفاء كوكب الأرض بفعل الثقوب السوداء؛ ففي الوقت الذي شكَّلَتْ فيه الجداول الزمنية والميزانيات خطرًا على مصادم الهادرونات الكبير، أثبتت الاعتبارات النظرية المُدعَمة بالتحقيقات والفحص الدقيق أن الثقوب السوداء لا تشكِّل أي خطر عليه.

لكن يجدر التوضيح هنا أن ذلك لا يعني أنه لا ينبغي طرح الأسئلة، فالعلماء — شأنهم شأن أي شخص آخَر — يجب عليهم التنبؤ بالعواقب الخطيرة المحتملة لأفعالهم، لكنه فيما يتعلَّق بمسألة الثقوب السوداء، استند الفيزيائيون إلى البيانات والنظريات العلمية الموجودة بالفعل لتقييم المخاطر؛ ومن ثَمَّ توصَّلوا إلى أنه ما من تهديد يستدعي القلق. وقبل الانتقال إلى مناقشة أكثر شموليةً للمخاطر في الفصل التالي، سيستعرض هذا الفصل الأسباب وراء التفكير في احتمال ظهور الثقوب السوداء بمصادم الهادرونات الكبير، ولماذا تُعَدُّ المخاوف من تسبُّبِ هذه الثقوب في نهاية العالم التي اقترحها البعض مخطئةً تمامًا. والتفاصيل التي سيتناولها هذا الفصل ليس لها دور مهم في المناقشة العامة التي سنستعرضها بعد ذلك، أو حتى في الاستعراض العام الوارد في الجزء التالي من الكتاب والخاص بما سيكتشفه مصادم الهادرونات الكبير. لكن هذه الأسئلة ستعكس نموذجًا للكيفية التي يفكِّر بها الفيزيائيون ويبنون تنبؤاتهم، وستمهِّد الطريقَ لاعتبارات أكثر شمولًا للمخاطر التي ستنتج عن المصادم.

الثقوب السوداء في مصادم الهادرونات الكبير

الثقوب السوداء هي أجسام ذات تجاذب تثاقلي قوي يجعلها تتصيد أي شيء يقترب منها، فأي شيء يقع داخل نصف قطر الثقب الأسود المعروف باسم «أفق الحدث» يُبتلَع ويُحبَس بالداخل. حتى الضوء، الذي يبدو غير ملحوظ، يخضع للمجال المغناطيسي الضخم للثقوب السوداء. لا يمكن لأي شيء الهروب من هذه الثقوب. يمزح أحد أصدقائي المعجبين بسلسلة أفلام «حرب النجوم» بشأن هذه الثقوب، واصفًا إياها بأنها «البورغيون المثاليون». وأي جسم يواجه ثقبًا أسود يُبتلَع داخله؛ إذ تنصُّ قوانين الجاذبية على أنه «لا جدوى من مقاومته».

تتكون الثقوب السوداء عندما تتركز كمية كافية من المادة داخل مساحة صغيرة بحيث تصير الجاذبية لا تُقهَر. ويعتمد حجم المنطقة اللازمة لتكوين ثقب أسود على مقدار الكتلة؛ فالكتلة الصغيرة يجب أن تتجمع في منطقة صغيرة نسبيًّا، في حين يمكن أن تتوزع الكتلة الأكبر على منطقة أكبر. وفي الحالتين، عندما تكون الكثافة كبيرةً والكتلة الحرجة في نطاق الحجم المطلوب، تصير قوة الجاذبية غير قابلة للمقاومة، ويتكوَّن ثقب أسود. كلاسيكيًّا (أيْ وفق الحسابات التي تتجاهل ميكانيكا الكم)، تنمو الثقوب السوداء مع مراكمتها للمادة القريبة منها، ووفق هذه الحسابات الكلاسيكية أيضًا، لا تتحلل هذه الثقوب السوداء.

قبل تسعينيات القرن العشرين، لم يفكِّر أحدٌ في تكوين الثقوب السوداء في المختبرات؛ نظرًا لأن الحد الأدنى من الكتلة اللازمة لتكوين ثقبٍ أسود هائلٌ للغاية مقارَنَةً بكتلة الجسيمات العادية أو طاقات المصادمات الحالية. وفي النهاية، تنطوي الثقوب السوداء على جاذبية شديدة القوة، بينما قوة الجاذبية لأي جسيم واحد نعرفه مهملة؛ أي أقل بكثير من أي قوًى أخرى مثل المغناطيسية الكهربائية. وإذا تماشت الجاذبية مع توقعاتنا، ففي كون يتألَّف فيه المكان من ثلاثة أبعاد، تُنتِج تصادمات الجسيمات عند طاقات يمكن الوصول إليها قدرًا أقل بكثير من الطاقة اللازمة لتكوين الثقوب السوداء. رغم ذلك، فإن هذه الثقوب موجودة في جميع أنحاء الكون، بل إنها تبدو موجودة في الواقع في مركز معظم المجرات الكبيرة، غير أن الطاقة اللازمة لتكوين ثقب أسود أكبر بخمس عشرة مرة على الأقل من أي شيء يمكن لأي مختبر تكوينه.

إذن لماذا يذكر أي شخص احتمالَ تكوينِ الثقوب السوداء في مصادم الهادرونات الكبير؟ يرجع السبب في ذلك إلى أن الفيزيائيين أدركوا أن المكان والجاذبية يمكن أن

يختلِفَا تمامًا عمَّا توصَّلوا إليه بالملاحظة حتى الآن. فيمكن للجاذبية الانتشار، ليس فقط في الأبعاد المكانية الثلاثة التي نعرفها، وإنما أيضًا في أبعاد أخرى لم تُرَ حتى الآن ولم يتم اكتشافها بعدُ. هذه الأبعاد ليس لها أي تأثير يمكن تحديده على أي قياسات أُجرِيَتْ حتى الآن، لكن من المحتمل أننا عندما نصل إلى طاقات مصادم الهادرونات الكبير أن تعبِّر جاذبية الأبعاد الإضافية — إن وُجِدَتْ — عن نفسها على نحوٍ قابلٍ للاكتشاف.

ومثلما سنرى لاحقًا في الفصل السابع عشر من هذا الكتاب، فإن فكرة الأبعاد الإضافية — التي استعرضناها بشكل مختصر في الفصل السابع — هي فكرة غريبة، لكنها تقوم على أسس نظرية معقولة، ويمكن أن تفسِّر أيضًا الضعفَ الهائلَ لقوة الجاذبية التي نعرفها. فيمكن للجاذبية أن تكون قوية في عالم ذي أبعاد إضافية، لكنها واهنة وضعيفة للغاية في العالم الثلاثي الأبعاد الذي نلاحظه. ووفقًا للفكرة التي عملت عليها أنا ورامانساندرم، قد تختلف الجاذبية في بُعْدٍ إضافي، فتكون أقوى في موضع ما، لكنها ضعيفة في موضعنا في المكان ذي الأبعاد الإضافية. لا نعلم إلى الآن أي هذه الأفكار صحيح. والأمر أبعد ما يكون عن اليقين، لكنه — كما سيوضِّح الفصل السابع عشر — من بين أكثر الأشياء التي قد يكتشفها الفيزيائيون التجريبيون في مصادم الهادرونات الكبير ترجيحًا.

تشير هذه السيناريوهات ضمنًا إلى أنه عند استكشافنا مسافات أصغر يمكن أن يظهر فيها أثر الأبعاد الإضافية، سيبدو لنا وجه مختلف تمامًا للجاذبية. فتشير النظريات، التي تتضمن أبعادًا إضافية، إلى أن الخصائص الفيزيائية للكون لا بد أن تتغيَّر عند الطاقات العليا والمسافات الصغرى التي سرعان ما سنكتشفها. وإذا كانت حقيقة الأبعاد الإضافية مسئولة بالفعل عن الظواهر المرصودة، يمكن لآثار الجاذبية أن تكون أقوى بكثير في ظل طاقات مصادم الهادرونات الكبير مما كان مُعتقَدًا في السابق. في هذه الحالة، لن تعتمد نتائج المصادم على الجاذبية كما نعلمها فحسب، وإنما أيضًا على الجاذبية الأقوى للكون ذي الأبعاد الإضافية.

في ظل هذه الجاذبية القوية، يمكن للبروتونات التصادم في منطقة دقيقة للغاية، تسمح باحتجاز الكمية اللازمة من الطاقة لتكوين ثقوب سوداء ذات أبعاد إضافية، وهذه الثقوب السوداء، إذا دامت لفترة كافية، فستبتلع المادة والطاقة، وإن فعلت ذلك للأبد، فستكون خطيرة بلا شك. هذا هو السيناريو الكارثي الذي تصوَّرَه المتخوِّفون.

لكن، لحسن الحظ، لا تعبِّر الحسابات الكلاسيكية للثقوب السوداء — وهي الحسابات التي لا تعتمد إلا على نظرية الجاذبية لأينشتاين — عن جميع جوانب هذه

المسألة. لستيفن هوكينج إنجازات عديدة تحمل اسمه في هذا المجال، لكن أحد أبرز اكتشافاته هو أن ميكانيكا الكم تقدِّم مخرجًا للمادة المحاصرة في الثقوب السوداء؛ إذ تسمح هذه الميكانيكا للثقوب السوداء بالتحلل.

إن سطح الثقب الأسود «ساخن»، وتعتمد درجة حرارته على كتلته. وتنبعث عن الثقوب السوداء أشعة مثل الجمر في سخونتها، فتبعث بالطاقة في جميع الاتجاهات؛ وبذلك تبتلع الثقوب السوداء كل ما يقترب منها، إلا أن ميكانيكا الكم تخبرنا بأن الجسيمات تتبخَّر من سطح الثقب الأسود عن طريق الإشعاع المسمى إشعاع هوكينج، حاملة الطاقة بعيدًا بحيث يتبدَّد الثقب ببطء. وتسمح هذه العملية للثقوب السوداء — بما في ذلك الكبيرة منها — بأن تبدِّد في النهاية كل طاقتها في صورة أشعة وتختفي.

وبما أن مصادم الهادرونات الكبير سيتضمن بالكاد القدر الكافي من الطاقة اللازمة لتكوين ثقب أسود، فإن الثقوب السوداء التي يمكن أن تتكون فيه ستكون صغيرة. وإذا بدأ الثقب الأسود صغيرًا وساخنًا، مثل الثقوب التي يمكن أن تتكون في مصادم الهادرونات الكبير، فسوف يختفي في الحال، فالتحلل الناتج عن إشعاع هوكينج سيبدِّد الثقبَ الأسود تمامًا. لذا، حتى إذا تكوَّنت ثقوب سوداء ذات أبعاد إضافية (بفرض صحة هذا الافتراض برمته)، فلن تدوم هذه الثقوب لفترة كافية بحيث تتسبَّب في أي أضرار. تتبخَّر الثقوب السوداء الكبيرة ببطء، لكن الثقوب الصغيرة تكون شديدةَ السخونة وتفقد طاقتها على الفور تقريبًا. وتُعَدُّ الثقوب السوداء غريبة في هذا الشأن؛ فمعظم الأجسام، مثل الجمر، تبرد عندما تنبعث أشعة منها، أما الثقوب السوداء فتزداد سخونة، وكلما صغر حجم الثقب زادت حرارته؛ ومن ثَمَّ انبعثت منه أشعة على نحو أكثر فعالية.

وبما أنني عالِمة، فحري بي الالتزام بالدقة في استعراض كافة الاحتمالات. من الناحية الفنية، ثمة اعتراض محتمل للجدل الموضَّح أعلاه القائم على فكرة إشعاع هوكينج وتحلُّل الثقوب السوداء. فنحن لا نتفهم سلوك الثقوب السوداء إلا عندما تصير كبيرةً بما فيه الكفاية، وفي هذه الحالة نعرف بالضبط المعادلات التي تصف نظام الجاذبية الخاص بها. والقوانين، التي اختُبِرت صحتها جيدًا، تقدِّم وصفًا رياضيًّا موثوقًا للثقوب السوداء. رغم ذلك، فليس لدينا صيغة جديرة بالثقة لما يمكن أن تبدو عليه الثقوب السوداء المتناهية الصغر، وهنا يأتي دور ميكانيكا الكم، ليس فقط فيما يتعلَّق بتبخُّر هذه الثقوب، وإنما أيضًا في وصف طبيعة هذه الأجسام نفسها.

ما من أحد يعلم بالضبط سلوك النظم التي تلعب فيها ميكانيكا الكم والجاذبية دورًا مهمًّا. ونظرية الأوتار هي أفضل محاولة للفيزيائيين في هذا الشأن، لكننا لم نفهم بعدُ كلَّ ما تنطوي عليه من تبعاتٍ. يعني ذلك أنه يمكن أن تكون هناك ثغرة من الناحية النظرية؛ فالثقوب السوداء المتناهية الصغر — التي لا يسعنا فهمها إلا في إطار نظرية الجاذبية الكمية — من المستبعد أن تسلك نفس سلوك الثقوب السوداء الكبيرة التي نستقي معلومات عنها باستخدام الجاذبية الكلاسيكية، فربما لا تتحلَّل هذه الثقوب السوداء المتناهية الصغر بالمعدلات التي نتوقَّعها.

لكن هذه الثغرة أيضًا ليست بالأمر الخطير؛ فمَن يساورهم القلق بشأن هذه الأجسام قليلون، هذا إن وُجِدوا على الإطلاق. الثقوب السوداء التي يمكن أن تنمو لتصير كبيرةً هي وحدها التي من المحتمل أن تكون خطيرة، أما الثقوب السوداء الصغيرة، فليس بإمكانها مراكَمَةُ ما يكفي من المادة لإحداث أي مشكلة. الخطر الوحيد المحتمل هو أن الأجسام الدقيقة قد تصل إلى حجم خطير قبل أن تتبخر، لكن حتى دون معرفة ماهية هذه الأجسام بالضبط، يمكننا تقدير الفترة التي ستدوم فيها. وتصل هذه التقديرات إلى أعمار أقل بكثير مما يتطلبه الثقب الأسود ليكون خطيرًا، الأمر الذي ينفي أي خطورة عن الأحداث الأكثر استبعادًا في احتمال حدوثها. والثقوب السوداء الصغيرة لن يختلف سلوكها كثيرًا عن الجسيمات الثقيلة غير المستقرة التي نَأْلفها؛ فشأنها شأن هذه الجسيمات القصيرة العمر، تتحلل سريعًا للغاية.

رغم ذلك، يظل القلق يساور البعض لأن استنتاج هوكينج — رغم اتساقه مع جميع قوانين الفيزياء المعروفة — يمكن أن يكون خاطئًا، وقد تكون الثقوب السوداء مستقرة تمامًا. ففي النهاية، إشعاع هوكينج لم تُختبَر صحته من قبلُ قطُّ باستخدام الملاحظات؛ نظرًا لأن الإشعاع الناتج عن الثقوب السوداء المعروفة ضعيف لدرجة لا تسمح برؤيته. والفيزيائيون متشكِّكون — ولهم الحق في ذلك — بشأن هذه الاعتراضات؛ لأنها لن تفرض عليهم تنحية فكرة إشعاع هوكينج جانبًا فحسب، وإنما أيضًا الكثير من جوانب النظريات الفيزيائية الأخرى المستقلة التي تمَّ التحقُّقُ من صحتها جيدًا. بالإضافة إلى ذلك، فإن المنطق الذي تقوم عليه فكرة إشعاع هوكينج يتنبَّأ بشكل مباشِر بظواهر أخرى تمت ملاحظتها، مما يمنحنا مزيدًا من الثقة في صحة هذه الفكرة.

لكن إشعاع هوكينج لم تسبق رؤيته من قبلُ قطُّ؛ لذا، ولتوخِّي الحذر، يطرح الفيزيائيون هذا السؤال: إذا كان إشعاع هوكينج خاطئًا بصورةٍ ما، وكانت الثقوب

السوداء التي قد يكوِّنها مصادم الهادرونات الكبير مستقرةً ولا تتحلل أبدًا، فهل ستكون خطيرة في هذه الحالة؟

لحسن الحظ، ثمَّةَ دليل أقوى يثبت أن الثقوب السوداء لا تتسبب في أي خطر. لا يطرح هذا الدليل أي افتراضات بشأن تحلُّلِ الثقوب السوداء، كما أنه ليس نظريًّا وإنما قائمٌ بالأساس على ملاحظاتنا للكون. في يونيو من عام ٢٠٠٨، كتب عالِمَا الفيزياء ستيف جيدينجز ومايكل أنجلو مانجانو،[1] ومن بعدهما بفترة وجيزة مجموعة تقييم أمان مصادم الهادرونات الكبير،[2] أبحاثًا واضحة مستندة إلى التجارب استبعدَتْ على نحوٍ مُقنِعٍ أي سيناريوهات كارثية للثقوب السوداء. أجرى جيدينجز ومانجانو حسابات للمعدل الذي يمكن أن تتكون به الثقوب السوداء والأثر الذي يمكن أن تكون قد أحدثته بالفعل في الكون إذا كانت مستقرة ولا تتحلَّل؛ فلاحَظَ العالمان أنه رغم عدم إنتاجنا الطاقات اللازمة لتكوين الثقوب السوداء — ناهيك عن الثقوب السوداء ذات الأبعاد الإضافية — في المعجِّلات الموجودة على سطح الأرض، فإن هذه الطاقات اللازمة لتكوُّنِ الثقوب تظهر كثيرًا في الكون. فالأشعة الكونية — وهي جسيمات عالية الطاقة — تجوب الفضاء طوال الوقت، وتصطدم عادةً بأجسام أخرى. ورغم عدم تمكُّنِنا من دراسة عواقب هذه الأشعة بالتفصيل مثلما نفعل باستخدام التجارب على سطح الأرض، فإن هذه التصادمات تنطوي عادةً على مستويات من الطاقة لا تقل عن تلك التي يمكن أن يصل إليها مصادم الهادرونات الكبير.

لذا، إذا كانت نظريات الأبعاد الإضافية صحيحةً، فقد تتكون الثقوب السوداء في الأجرام الفلكية، بما في ذلك الأرض والشمس. وقد قدَّرَ جيدينجز ومانجانو أنه في بعض النماذج (يعتمد المعدل على عدد الأبعاد الإضافية) تنمو الثقوب السوداء ببطء شديد يَحُول دون اتِّسَامها بالخطورة؛ فحتى على مدى مليارات السنين، تظل معظم الثقوب السوداء صغيرة للغاية. في حالات أخرى، يمكن للثقوب السوداء بلا شك جمع ما يكفي من المادة ليزداد حجمها، لكنها تحمل شحنة عادةً، وإذا كانت هذه الثقوب خطيرة، لكانت حوصِرت داخل الأرض والشمس، ولكان كلا هذين الجِرمين قد اختفيا منذ زمن بعيد. لكن بما أن الأرض والشمس لم يمسهما سوء، فمعنى ذلك أن الثقوب السوداء ذات الشحنات — حتى تلك التي تجمع المادة سريعًا — لا يمكن أن يكون لها عواقب خطيرة.

من ثَمَّ، فإن السيناريو الخطير الوحيد المحتمَل المتبقي هو ألَّا تحمل الثقوب شحنةً، لكنها يمكن أن تنمو بسرعة تكفي لأن تفرض تهديدًا. في هذه الحالة، لا يكون التجاذُب التثاقلي للأرض — وهو القوة الوحيدة التي بإمكانها إبطاء هذه الثقوب — على القدر الكافي من القوة لإيقافها؛ وبذلك تَعْبُر هذه الثقوب السوداء الأرضَ، فلا نتمكن من استخدام وجود الأرض لاستنباط أي استنتاجات بشأن خطرها المحتمل.

لكن جيدينجز ومانجانو استبعَدَا هذا الاحتمال أيضًا؛ نظرًا لأن التجاذُبَ التثاقلي للأجرام الفيزيائية الفلكية الأعلى كثافةً — النجوم النيوترونية والأقزام البيضاء — قويٌّ بما يكفي لإيقاف الثقوب السوداء قبل تمكُّنِها من الهروب. والأشعة الكونية الفائقة الطاقة التي تصطدم بالنجوم الكثيفة ذات تفاعلات الجاذبية القوية، كان من الممكن أن تنتج نفسَ نوعِ الثقوب السوداء التي يمكن لمصادم الهادرونات الكبير تكوينها. والنجوم النيوترونية والأقزام البيضاء أعلى كثافةً بكثير من الأرض؛ وهي الكثافة التي تجعل جاذبيتها وحدها كافيةً لإبقاء الثقوب السوداء بداخلها. وإذا كانت الثقوب السوداء قد تكوَّنَتْ، وانطوت على خطورة، لكانت دمرت هذه الأجسام التي نعرفها على مدى مليارات السنين الماضية. وعدد هذه الأجسام في السماء يوضِّح لنا أنه حتى إذا كانت الثقوب السوداء موجودة، فإنها بالتأكيد ليست خطيرة، وحتى إذا كانت الثقوب السوداء قد تكوَّنَتْ، فلا بد أنها اختفت على الفور، أو لعلها في أسوأ الأحوال قد تركت بقايا دقيقة مستقرة غير ضارة، وما كان ليسنح لها الوقت الكافي لإحداث أي ضرر.

وفوق كل ذلك، أثناء جمع الثقوب السوداء للمادة وتدميرها لهذه الأجرام، من المفترض أن تصدر كميات كبيرة من الضوء المرئي، وهو ما لم يره أحد على الإطلاق. ومن ثَمَّ، فإن وجود الكون كما نعرفه وغياب أي علامات تدل على تدمير الأقزام البيضاء دليلٌ مقنعٌ للغاية على أن أي ثقوب سوداء يمكن لمصادم الهادرونات الكبير تكوينها لا يمكن أن تكون خطيرةً. مع وضع حالة الكون في الاعتبار، يمكننا استنتاج أن الثقوب السوداء بمصادم الهادرونات الكبير لا تمثِّل خطرًا على الأرض.

سأمنحكم الآن لحظة لتتنفسوا الصُّعَداء بعد هذه الأخبار السعيدة، لكنني سأواصل مناقشة موضوع الثقوب السوداء باقتضاب، لكنْ هذه المرةَ من منظوري كشخص يعمل على موضوعات مرتبطة بهذه الثقوب، مثل أبعاد الفضاء الإضافية اللازمة لتكوُّن الثقوب السوداء المنخفضة الطاقة.

أثارَ هذا الموضوع اهتمامي بالفعل قبل احتدام النقاش حوله في الأخبار، فلي زميل وصديق في فرنسا كان يعمل في السابق في سيرن، لكنه يعمل الآن على تجربة تحمل

اسم «أوجيه». تتناول هذه التجربةُ الأشعةَ الكونية عند نزولها عبر الغلاف الجوي نحو الأرض. شكى لي هذا الزميل من أن مصادم الهادرونات الكبير يستولي على الموارد التي يمكن استخدامها لدراسة نطاقات الطاقة ذاتها في الأشعة الكونية التي يدرسها، وبما أن تجربته أقل دقةً بكثير، فإن النوع الوحيد من الأحداث التي يمكن لهذه التجربة التوصُّل إليها هي الأحداث ذات الآثار الجلية، مثل تحلُّل الثقوب السوداء.

لذا، عملتُ برفقة زميل يدرس بمرحلة ما بعد الدكتوراه في جامعة هارفرد آنذاك، ويُدعَى باتريك ميد، على حساب عدد الأحداث التي يمكن لتجربة «أوجيه» رصدها. وباستخدام حسابات أكثر دقةً، توصَّلْنا إلى أن هذا العدد أقل بكثير من التوقعات المتفائلة للفيزيائيين في البداية. وأصف التوقعات هنا بالمتفائلة؛ يتحمَّسون دائمًا بشأن الأدلة التي من شأنها تغيير علم الفيزياء، ولم يساورنا القلق بشأن أي كوارث يمكن أن تتعرض لها الأرض أو الكون، والتي آمُلُ الآنَ أن تتفق معي في أنها لا تمثِّل تهديدًا حقيقيًّا.

بعد أن أدركنا أن تجربة «أوجيه» لن تكتشف أي ثقوب سوداء دقيقة الحجم — حتى إذا كانت تفسيرات الأبعاد الإضافية لظواهر فيزياء الجسيمات صحيحةً — أثارت الحسابات فضولنا بشأن الادِّعَاءات التي أثارها فيزيائيون آخَرون بأن الثقوب السوداء يمكن أن تتكون بوفرة في مصادم الهادرونات الكبير؛ فتوصَّلْنا إلى أن هذه المعدلات قد بُولِغ في تقديرها أيضًا. فرغم أن التقديرات التقريبية أشارت إلى أنه في هذه السيناريوهات سيكوِّن مصادم الهادرونات الكبير عددًا كبيرًا من الثقوب السوداء، أثبتَتِ الحسابات التفصيلية التي أجريناها عدمَ صحةِ ذلك.

لم نهتم أنا وباتريك بالثقوب السوداء الخطيرة، وإنما ما أردنا معرفته هو ما إذا كانت الثقوب السوداء الصغيرة غير الضارة السريعة التحلُّل ذات الأبعاد الإضافية يمكن أن تتكون أم لا؛ ومن ثَمَّ تدل على وجود الجاذبية ذات الأبعاد الإضافية، أو عدم وجودها. وقد توصَّلْنا بالحسابات إلى أن حدوث ذلك أمر نادر للغاية، هذا إنْ حدَثَ على الإطلاق. لا ريب أنه في حال كان ذلك ممكنًا، لكانت الثقوب السوداء الصغيرة دليلًا مذهلًا على صحة النظرية التي طرحتها أنا ورامان، لكن بصفتي عالِمة، عليَّ الانتباه للحسابات. في ظل ما توصَّلْنا إليه من نتائج، نحن لا نتمتع برفاهية الخطأ في التوقعات؛ ومن ثَمَّ فلا أتوقع أنا أو باتريك (وأغلب الفيزيائيين الآخَرين) ظهور الثقوب السوداء، حتى الصغيرة منها.

هذا هو حال العلم؛ تطرأ الأفكار بعقول بعض الأفراد، فيدرسونها على نحو تقريبي، ثم يتناولون — هم أو غيرهم — التفاصيل المتعلقة بها. وحقيقة أن الفكرة الأولية يلزم تعديلها بعد مزيد من التدقيق ليست دلالة على القصور، وإنما علامة على أن العلمَ صعبٌ والتقدُّمَ يكون عادةً تراكميًّا. وتتضمن المراحل الوسيطة تعديلات تقدُّمية أو تراجعية إلى أن يستقر العلماء — نظريًّا وتجريبيًّا — على أفضل الأفكار. وللأسف، لم ننتهِ أنا وباتريك من حساباتنا في الوقت المناسب لكي نَحُول دون انتشار الجدل حول الثقوب السوداء في الصحف ووصوله إلى ساحة القضاء.

لكننا أدركنا أنه سواء أكان من الممكن تكوُّن الثقوب السوداء أم لا، فإن الآثار المهمة الأخرى للجسيمات المتفاعلة بقوة في مصادم الهادرونات الكبير قد تقدِّم لنا أدلةً مهمةً بشأن الطبيعة الأساسية للقوى والجاذبية. فسوف نرى هذه العلامات الأخرى للأبعاد الإضافية عند طاقات أقل. وحتى نرى هذه العلامات الأخرى الغريبة، نعلم أنه ما من فرصة لتكوُّن الثقوب السوداء، لكن هذه العلامات ذاتها قد توضِّح في النهاية بعض الجوانب بشأن الجاذبية.

يُعَدُّ هذا العمل نموذجًا لجانب آخَر مهمٍّ من جوانب العلم. فرغم أن النماذج الفكرية قد تتبدَّل تبدُّلًا هائلًا في إطار النطاقات المختلفة، فإننا نادرًا ما نواجِه مثل هذا التبدُّل المفاجئ في البيانات ذاتها. فالبيانات المتوفرة بالفعل تتسبَّب أحيانًا في تغيُّرات في النماذج الفكرية، مثلما فسَّرَتْ ميكانيكا الكم في النهاية الخطوطَ الطيفية المعروفة، لكن غالبًا ما تكون الانحرافات البسيطة عن التوقعات في التجارب القائمة بالفعل استهلالًا لأدلة مستقبلية أكثر قوة. وحتى التطبيقات الخطيرة للعلم تستغرق وقتًا لتتطور؛ فنجد مثلًا مَن يُلقِي بالمسئولية على عاتق العلماء في بعض النواحي فيما يتعلَّق بعصر السلاح النووي، لكن الحقيقة هي أنه لم يكتشف أي عالم القنبلة النووية فجأةً بالمصادفة. إن فهم التكافؤ بين المادة والطاقة لم يكن كافيًا، وكان على العلماء بذل الجهود لتهيئة المادة في صورتها المتفجرة الخطيرة.

يمكن للثقوب السوداء أن تكون مدعاة للقلق إذا صارت كبيرة، الأمر الذي أثبتت الحسابات والملاحظات أنه لن يحدث، لكن حتى لو حدث، فإن الثقوب السوداء الصغيرة — أو على الأقل آثار الجاذبية على التفاعلات بين الجسيمات التي تناولناها للتوِّ — ستشير إلى وجود تحوُّلٍ في الجاذبية أولًا.

ختامًا، فإن الثقوب السوداء لا تمثِّل أيَّ خطر، لكن إذا اقتضى الأمر، فإنني أَعِدُ بتحمُّل المسئولية كاملةً إذا تسبَّب مصادم الهادرونات الكبير في تكوُّن ثقب أسود من

شأنه ابتلاع الأرض داخله. وإلى أن يحدث ذلك، يمكنك اتباع الاقتراح الذي أشار عليَّ طلابي به في الحلقات الدراسية التي أعطيها للمبتدئين، وهو مطالعة الرابط التالي: .http://hasthelargehadroncolliderdestroyedtheworldyet.com

الفصل الحادي عشر

عمل محفوف بالمخاطر

في خريف عام ٢٠٠٩، عقد نيت سيلفر — مؤسِّس مدونة «فايف ثيرتي إيت» التي أحرزت أفضل التوقعات بشأن نتائج انتخابات الرئاسة الأمريكية في عام ٢٠٠٨ — لقاءً معي من أجل كتابٍ عمد لتأليفه آنذاك عن التنبؤات. كان الأمريكيون يواجهون حينذاك أزمة اقتصادية، وحربًا تبدو خاسرة في أفغانستان، وارتفاعًا في تكاليف الرعاية الصحية، وتغيراتٍ مناخيةً غير قابلة للإصلاح على الأرجح، وغير ذلك من التهديدات الوشيكة. وافقتُ على الالتقاء به من باب المصلحة المتبادلة؛ إذ كنتُ مهتمةً بمعرفة آراء نيت بشأن الاحتمالية، ومتى تنجح التنبؤات ولماذا.

ومع ذلك، فقد كنتُ متحيِّرة بعض الشيء بشأن اختياره لي لعقد هذا اللقاء معي؛ فخبرتي كلها قاصرة على التنبؤ بنتائج التصادمات بين الجسيمات، الأمر الذي أشك في أن الناس في لاس فيجاس — ناهيك عن الحكومة — يمكن أن يتراهنوا عليه. ظننت أن نيت قد يسألني عن الثقوب السوداء في مصادم الهادرونات الكبير، لكن رغم الدعوى القضائية المتعلقة بالمخاطر المحتملة للمصادم في هذا الشأن، التي كانت قد سقطت آنذاك، شككتُ حقًّا في أن يسألني نيت عن هذا الأمر، مع الوضع في الاعتبار التهديدات الأكثر خطورةً الموضحة أعلاه.

في الواقع، لم يكن نيت مهتمًّا بهذا الموضوع؛ فقد طرح عليَّ أسئلة مدروسة على نحو أكثر دقة بشأن الكيفية التي يُجرِي بها فيزيائيو الجسيمات التنبؤاتِ والتكهناتِ بشأن مصادم الهادرونات الكبير وغيره من التجارب الأخرى. نيت مهتم بالتنبؤات، والعلماء متخصِّصون في موضوع طرح التنبؤات، وقد أراد أن يعرف المزيد عن كيفية اختيارنا للأسئلة التي نطرحها، والأساليب التي نستخدمها للتكهُّن بما يمكن حدوثه، وهي الأسئلة التي سنتناولها بشكل كامل قريبًا.

لكن قبل النظر في تجارب مصادم الهادرونات الكبير والتكهنات المتعلقة بما يمكننا التوصُّل إليه من خلاله، نواصِل في هذا الفصل مناقشتنا للمخاطر. فالتوجهات الغريبة حيال المخاطر الآن، وصور الارتباك المتعلقة بتوقيت وكيفية التنبؤ بهذه المخاطر تستحق بعض التفكير بالتأكيد. تطالعنا الأخبار يوميًّا بعدد لا يُحصَى من العواقب الوخيمة للمشكلات التي لم يتم التنبُّؤ بها أو التخفيفُ من حدتها، ولعل التفكير بشأن فيزياء الجسيمات والفصل حسب النطاق يمكن أن يُلقِي ببعض الضوء على هذا الموضوع المعقد. ورغم أنه ما من شك بأن الدعوى القضائية المتعلقة بالثقوب السوداء في مصادم الهادرونات الكبير كانت باطلةً، فإن كلًّا من هذه الدعوى والقضايا الملحة الأخرى في العصر الحالي يمكن أن تساعد في تنبيهنا لأهمية التعامل مع موضوع المخاطر.

يختلف إجراء التنبؤات في فيزياء الجسيمات كلَّ الاختلاف عن تقييم المخاطر في العالم الواقعي، ولا يتَّسِع لنا المجال في فصل واحد إلا لإلقاء نظرة سريعة فحسب على الحقائق الوثيقة الصلة بموضوع تقييم المخاطر والتخفيف منها. فضلًا عن ذلك، لن يمكننا تعميم مثال الثقوب السوداء؛ لأن هذا الخطر غير موجود في الأساس، لكنه مع ذلك يساعد في توجيهنا في التعرُّف على بعض القضايا ذات الصلة عندما نفكِّر في كيفية تقييم المخاطر وتفسيرها، وسوف نرى أنه بالرغم من أن الثقوب السوداء في مصادم الهادرونات الكبير لم تمثِّل تهديدًا قطُّ، فإن التطبيقات المُضلِّلة للتنبؤات تفعل ذلك غالبًا.

الخطر في العالم

عندما تناوَلَ الفيزيائيون التنبؤات بشأن الثقوب السوداء في مصادم الهادرونات الكبير، قدَّروا استقرائيًّا النظريات العلمية القائمة بالفعل في نطاقات من الطاقة لم تُكتشَف بعدُ، وكان لدينا من الاعتبارات النظرية الدقيقة والأدلة التجريبية الواضحة ما سمح لنا باستنتاج أنه ما من شيء كارثي يمكن أن يحدث، حتى في ظل عدم معرفتنا بعدُ بما يمكن أن يظهر. وبعد الدراسات الدقيقة، اتفق جميع العلماء على أن خطر الثقوب السوداء لا يُعبَأ به؛ فليس هناك أدنى احتمال لأن يسبِّب أي مشكلة، حتى على مدار عمر الكون بأكمله.

يختلف ذلك كثيرًا عن كيفية التعامل مع المخاطر المحتملة الأخرى. ولا أزال في حيرة من أمري بشأن عدم توقُّع الاقتصاديين والخبراء الماليين للأزمة المالية قبل حدوثها ببضعة أعوام، بل وعدم تهيُّئِهم بعد وقوعها لاحتمال وقوع أزمة جديدة. فبالرغم من

أن الاقتصاديين والخبراء الماليين لم يتفقوا جميعًا حول ما كان لدى البعض من تنبؤات مشئومة، فلم يتدخل أحد لإنقاذ الوضع إلى أن تعرَّض الاقتصاد للانهيار.

في خريف عام ٢٠٠٨، شاركت في أحد المؤتمرات المتعددة التخصصات كأحد أعضاء هيئة الخبراء، وطُرِحت عليَّ أسئلة — ليس للمرة الأولى ولا الأخيرة — بشأن خطر الثقوب السوداء. مزح معي نائب رئيس مجلس إدارة بنك جولدمان ساكس إنترناشونال، الذي كان يجلس بجواري، قائلًا إن الثقب الأسود الحقيقي الذي يواجِهه الجميع هو الاقتصاد. وكان تشبيهًا موفَّقًا حقًّا.

تتصيَّدُ الثقوب السوداء أيَّ شيء يقترب منها وتغيِّر هيئته بواسطة القوى القوية الموجودة بداخلها، وبما أن الثقوب السوداء تتميَّز بكتلتها، وشحنتها، وكمية تُعرَف باسم «الزخم الزاوي»، فإنها لا تترك أثرًا لما يدخل فيها أو كيفية وصوله هناك؛ فالمعلومات التي تدخل إليها تختفي على ما يبدو. تصدر هذه الثقوب المعلومات بعد ذلك لكن ببطء، عن طريق الارتباطات الدقيقة في الإشعاع الذي يتسرَّب منها، هذا فضلًا عن أن الثقوب السوداء الكبيرة تتحلَّل ببطء، في حين تختفي الصغيرة منها على الفور. يعني ذلك أنه بينما لا تدوم الثقوب السوداء الصغيرة طويلًا، فإن الكبيرة منها لا يسمح لها حجمُها بالاختفاء. هل يذكِّرك ذلك بشيء؟ المعلومات — بالإضافة إلى الديون والمشتقات — التي دخلت البنوك صارت محصورة داخلها، وتحوَّلت إلى أصول معقَّدَة يصعب فكُّ طلاسمها. وفيما بعدُ، صارت المعلومات — وكل شيء آخَر دخل إلى البنوك — تخرج منها ببطء.

في ظل الظواهر العالمية العديدة التي نشهدها حاليًّا، يمكننا أن نلاحظ أن ما نجريه حقًّا هو تجارب غير مقيَّدَة على نطاق واسع. سُئِلتُ ذات مرة في البرنامج الإذاعي «كوست تو كوست» عمَّا إذا كنتُ سأواصِل العمل على تجربةٍ ما — بغض النظر عن مدى إثارتها — إذا ما كان هناك احتمال أن تُعرِّض هذه التجربة العالم أجمع للخطر. وكانت إجابتي — التي أزعجت جمهور الإذاعة الذي ينتمي أغلبه للتيار المحافظ — هي أننا نجري بالفعل مثل هذه التجارب على انبعاثات الكربون، فلماذا لم يقلق عدد أكبر من الناس بشأن ذلك؟

كما هو الحال مع صور التقدُّم العلمي، نادرًا ما تحدث تغيُّرات مفاجئة دون أن يكون لها أي مؤشرات سابقة. فنحن لا نعلم جزمًا بأن المناخ سيتغيَّر تغيُّرًا كارثيًّا، لكننا شهدنا بالفعل مؤشرات على ذلك في ذوبان الأنهار الجليدية وتغيُّر أنماط الطقس. وربما يكون الاقتصاد قد انهار فجأة في عام ٢٠٠٨، لكن العديد من الخبراء الماليين كان

لديهم من المعرفة ما جعلهم ينسحبون من الأسواق المالية قبل حدوث الانهيار. بإمكان الأدوات المالية الجديدة ومستويات الكربون الأعلى إحداثُ تغييرات جذرية، وفي مثل هذه المواقف الواقعية، ليس السؤال هو ما إذا كان هناك خطر أم لا، وإنما ما نحتاج إليه هو تحديد مدى الحذر الذي علينا توخِّيه إذا أردنا تقدير المخاطر المحتملة واتخاذ قرار بشأن مستوى الحذر المقبول.

حساب المخاطر

من المنظور المثالي، يعد حساب المخاطر إحدى الخطوات الأولى الواجب اتخاذها لتحديد مدى الحذر الذي ينبغي توخِّيه. أحيانًا، يخطئ الناس في فهم الاحتمالات. على سبيل المثال، في اللقاء الذي أجراه جون أوليفر مع والتر واجنر — أحد الخصوم في قضية مصادم الهادرونات الكبير — حول الثقوب السوداء في برنامج «ذا دايلي شو»، فقَدَ واجنر مصداقيتَه تمامًا عندما قال إن احتمال تدمير مصادم الهادرونات الكبير للأرض يبلغ ٥٠٪؛ لأن هذا الأمر إما سيحدث أو لن يحدث. وجاء ردُّ جون أوليفر متشكِّكًا: «لا أعتقد أن هذا ما يعنيه مفهوم الاحتمالية.» ولحسن الحظ، كان جون أوليفر محقًّا في قوله، فيمكننا التوصُّل إلى تقديرات أفضل (وأقل مساواة) للاحتمالات.

لكن الأمر ليس سهلًا دومًا؛ لك أن تفكِّر مثلًا في احتمالات تغيُّر المناخ تغيُّرًا ضارًّا، أو احتمالات ما سينتهي إليه وَضْع سيِّئ ما في الشرق الأوسط، أو مصير الاقتصاد. فكل هذه مواقف أكثر تعقيدًا بكثير، ولا تقتصر صعوبتها على أن المعادلات التي تصف المخاطر يصعب حلها فحسب، وإنما في عدم معرفتنا بالضرورة ماهية هذه المعادلات في الأساس. على سبيل المثال، فيما يتعلق بتغير المناخ، يمكننا إجراء عمليات محاكاة ودراسة السجل التاريخي، أما في المثالين الآخَرين، فيمكننا البحث عن مواقف تاريخية مشابهة، أو إنشاء نماذج مبسطة، لكن في الحالات الثلاث، يشوب أي تنبؤات قدرٌ هائلٌ من الشكوك.

إن التنبؤات الدقيقة والجديرة بالثقة صعبة، فحتى عندما يبذل الناس أقصى ما في وسعهم لوضع نموذج لكل شيء ذي صلة، تؤثِّر المدخلات والافتراضات التي تدخل أيًّا من هذه النماذج تأثيرًا كبيرًا على النتيجة. والتنبؤ بانخفاض الخطر المحتمل لا معنى له إذا كانت الشكوك المرتبطة بالافتراضات المتعلقة به أكبر بكثير؛ لذا من المهم تحرِّي الدقة والنزاهة بشأن الشكوك إذا أردنا أن يكون للتنبؤ قيمة.

قبل استعراض أي نماذج أخرى، دعوني أروِ لكم قصة قصيرة توضِّح هذه المشكلة. في بداية عملي بمجال الفيزياء، لاحظت أن النموذج القياسي يسمح بنطاق أوسع بكثير من القيم لأي كمية معينة مقارَنَةً بما تم التنبؤ به في السابق، ويرجع ذلك إلى مساهمة ميكانيكية كمية اعتمد حجمها على القيمة الكبيرة والمذهلة المقيسة حديثًا (في ذلك الوقت) لكتلة الكوارك القمي. عندما عرضتُ النتيجة التي توصلت إليها في أحد المؤتمرات، طُلِب مني أن أبني تنبُّئي على دالة لكتلة الكوارك القمي، لكنني رفضت؛ لأنني كنتُ أعلم بوجود العديد من العوامل الأخرى التي تساهم في الأمر، ولعلمي بأن المقدار المتبقي من عدم اليقين يسمح بنطاق واسع من الاحتمالات، التي يمكنها أن تنتج ذلك التنبؤ. لكن زميلًا «خبيرًا» آخَر قلَّل من شأن هذه الشكوك وبنى ما توصَّلَ إليه على دالة كتلة الكوارك القمي (وهو ليس بالأمر المستغرب فيما يخص العديد من التنبؤات الواقعية حاليًّا)، وظل يُشَار إلى تنبُّئِه على نطاق واسع لفترة من الوقت. بَيْدَ أنه في النهاية، لمَّا لم تقع الكمية المقيسة في النطاق الذي توقَّعَه، نُسِبَ عدم التوافق — عن حق — إلى التقدير المفرط في التفاؤل الذي وضعه ذلك الزميل. من الجلي أنه من الأفضل تجنُّب مثل هذه المواقف المحرجة، سواء في العلم أو المواقف الواقعية؛ فنحن نبغي أن تكون التنبؤات ذات معنى، ولن تكون كذلك إلا عندما نتوخَّى الحذرَ بشأن الشكوك التي نستخدمها في التوصُّل إلى هذه التنبؤات.

تفرض المواقف الواقعية مشكلات أكثر استعصاءً على الحل، وتتطلب منَّا أن نكون على قدر أكبر من الحذر بشأن الشكوك والأمور المجهولة؛ فعلينا الحذر من استخدام التنبؤات الكمية التي لا تأخذ — أو لا يمكنها أن تأخذ — في الاعتبار هذه المشكلات.

وتتمثَّل إحدى العقبات التي تقف في طريق حساب المخاطر، في التوصُّل إلى تقدير ملائم للمخاطر الشاملة التي يصعب دومًا تحديد حجمها. ففي أي نظام كبير مترابط، تكون غالبًا العناصرُ الواسعةُ النطاق، التي تتضمن نماذج فشل متعددة ناتجة عن العلاقات المتبادلة العديدة للأجزاء الأصغر حجمًا، هي الأقل خضوعًا للإشراف، ويمكن للمعلومات أن تُفقَد في عمليات النقل أو لا يُعنَى بها في المقام الأول، مثل هذه المشكلات الشاملة يمكن أن تضخِّم من عواقب أي مخاطر أخرى محتملة.

ولقد شاهدتُ مثل هذا النوع من المشكلات الهيكلية بنفسي عندما كنت عضوة بإحدى اللجان التي تناولت موضوع الأمان في وكالة ناسا. فمن أجل استرضاء مقاطعات الكونجرس المختلفة، وُزِّعت مواقع وكالة ناسا بجميع أنحاء الولايات المتحدة؛ وكانت

نتيجة ذلك أنه حتى في ظل اهتمام كل موقع من هذه المواقع بما لديه من معدات، كان هناك تراجُع في الاستثمار المؤسَّسِي في العلاقات بين المواقع. ينطبق ذلك أيضًا على المؤسسات الأكبر حجمًا، فيمكن للمعلومات أن تُفقَد أثناء عمليات إرسال التقارير بين المواقع الفرعية المختلفة. وفي إحدى رسائل البريد الإلكتروني التي تلقَّيْتُها من جو فراجولا، محلِّل المخاطر بوكالة ناسا وصناعة الفضاء الجوي، الذي أجرى الدراسة، قال لي: «لقد أثبتَتْ لي خبرتي أن تحليل المخاطر الذي يُجرَى دون نشاط مشترك بين الخبراء المَعْنيِّين وفريق تكامُل النظم وفريق تحليل المخاطر؛ محكومٌ عليه بالفشل. وأذكر هنا، على وجه الخصوص، تحليلات المخاطر «الكلية» التي صارت من الأنشطة الأكتوارية ولم تَعُدْ تهتم بها سوى الأوساط الأكاديمية.» وجدير بالذكر أن مصطلحي السعة والتفصيل صارَا يُستخدَمَان بالتبادل في أحيان كثيرة، لكن الحقيقة هي أن كليهما ضروري على المدى الطويل.

من العواقب الخطيرة لمثل هذا الفشل (على سبيل المثال لا الحصر) حادث التسرب النفطي بخليج المكسيك؛ ففي خطاب بجامعة هارفرد في فبراير عام ٢٠١١، أشارت تشيري موري — العميدة بجامعة هارفرد، وعضوة اللجنة الوطنية المعنية بحادث التسرُّب النفطي بخليج المكسيك والحفر داخل المياه — إلى الفشل الإداري كأحد العناصر الرئيسية المساهمة في ذلك الحادث. أما ريتشارد سيرز — المستشار العلمي والهندسي الأول باللجنة، ونائب الرئيس السابق لخدمات المياه العميقة بشركة شِل — فوصف كيف أن إدارة شركة بي بي تعامَلَتْ مع كل مشكلة على حدة، دون أن تكوِّن صورةً شاملةً في إطار ما أطلَقَ عليه سيرز «التفكير الخطي المتشعب».

رغم أن فيزياء الجسيمات عمل متخصِّص وصعب، فإن هدفها هو عَزْل عناصرها الأساسية البسيطة وإجراء تنبؤات واضحة قائمة على الفرضيات التي يضعها العلماء. ويكمن التحدي في الوصول إلى المسافات الصغيرة والطاقات العالية، وليس في التعامل مع العلاقات المتبادَلَة المعقَّدَة. ورغم أننا قد لا نعرف بالضرورة أي النماذج الأساسية صحيح، فإن بوسعنا التنبؤ — في ظل نموذج معين — بالتوقيت الذي من المفترض أن تقع فيه أحداث معينة، مثل تصادم البروتونات بعضها ببعض في مصادم الهادرونات الكبير. وعندما يتم استيعاب النطاقات الصغيرة داخل النطاقات الأكبر، توضِّح لنا النظرياتُ الفعَّالة المناسِبَة لهذه النطاقات الكبيرة كيفيةَ دخول النطاقات الصغيرة إليها بالضبط، بالإضافة إلى الأخطاء التي يمكننا الوقوع فيها إذا تجاهلنا تفاصيل هذه النطاقات الصغيرة.

لكن في معظم الأحيان، لا ينطبق بسهولة الفَصْل حسب النطاق الذي استعرضناه في الفصل الأول من هذا الكتاب. فبالرغم من الأساليب المشتركة أحيانًا بين عالم المال وعالم الفيزياء، فإن «التمويل ليس أحد فروع الفيزياء» كما ورد على لسان أكثر من مصرفيٍّ في نيويورك. ففي مجال المناخ أو العمل المصرفي، يمكن أن تلعب معرفة التفاعلات على نطاق صغير دورًا أساسيًّا في تحديد نتائج النطاقات الكبيرة.

هذا الافتقار للفصل بين النطاقات يمكن أن يُسفِر عن عواقب وخيمة، ومن الأمثلة على ذلك انهيار بنك بارينجز. قبل حدوث ذلك الانهيار، كان ذلك البنك — المؤسَّس عام ١٧٦٢ — أقدم بنك تجاري في بريطانيا، وقد موَّل الحروب النابليونية، وشراء ولاية لويزيانا، وقناة إيري، إلا أنه في عام ١٩٩٥، كادت تُسفِر المراهنات الفاسدة لتاجر واحد محتال في مكتب صغير بسنغافورة عن تعرُّض البنك لانهيار مالي.

ومؤخرًا، كادت تسفر مؤامرات جوزيف كاسانو في المجموعة الأمريكية الدولية عن تدمير المجموعة، فضلًا عمَّا أحدثته من تهديد بحدوث انهيار مالي كبير على مستوى العالم أجمع. رأس كاسانو وحدة صغيرة نسبيًّا (تتألَّف من ٤٠٠ فرد) داخل الشركة، وهي «المجموعة الأمريكية الدولية للمنتجات المالية»، وكانت المجموعة الأمريكية الدولية قد أجرت مراهنات مستقرة على نحو معقول إلى أن بدأ كاسانو في إجراء عقود مبادلة العجز الائتماني (وهي وسيلة استثمارية معقَّدَة روَّجَتْ لها بنوكٌ عديدة) لتغطية الرهونات التي أُجرِيت على التزامات ديون مضمونة.

وفي ظل ما يبدو لنا من منظورنا الحالي نظام هرمي من التغطية، وضعت مجموعته ما يصل إلى ٥٠٠ مليار دولار في عقود مبادلة العجز الائتماني، وخُصِّصَ من هذا المبلغ ٦٠ مليار دولار للرهونات العقارية عالية المخاطر.[1] وإذا كانت الوحدات الثانوية قد استوعبتها النظم الكبرى كما هو الحال في الفيزياء، لكانت الوحدات الثانوية قد أظهرت معلومة أو نشاطًا ما بمستوًى أعلى يمكِّن المشرف بالمستوى المتوسط من التعامل معه بسهولة. لكن في انتهاك مفرط ومؤسف وغير ضروري للفصل بين النطاقات، لم تخضع مؤامرات كاسانو للإشراف الفعلي، وتسلَّلَتْ آثارها إلى الشركة بأكملها. لم تُنظَّم أنشطته كأوراق مالية، أو كمضاربات، أو كتأمينات، ووزِّعت عقود مبادلة العجز الائتماني بجميع أنحاء العالم، ولم يتناول أحدٌ الآثارَ المحتملة لذلك؛ ومن ثَمَّ عندما وقعت أزمة الرهونات العقارية العالية المخاطر، لم تكن المجموعة الأمريكية الدولية على استعداد لها، وانهارت داخليًّا بفعل الخسائر، وفي النهاية تكبَّدَ ثمنَ ذلك دافعو الضرائب من الشعب الأمريكي.

لقد اهتمَّ واضعو اللوائح التنظيمية (إلى حدٍّ ما) بقضايا السلامة التقليدية المتعلِّقة بسلامة المؤسسات الفردية، لكنهم لم يقيِّموا النظام ككل، أو المخاطر المترابطة الموجودة بداخله. والنظم الأكثر تعقيدًا ذات الديون والالتزامات المتداخلة تستلزم فهمًا أفضل لهذه الارتباطات وأسلوبًا أكثر شموليةً في إجراء التقييم والمقارَنَةِ واتخاذ القرارات فيما يتعلق بالمخاطر والفوائد المحتملة المتبادلة.[2] ينطبق هذا التحدي على أي نظام كبير تقريبًا، تمامًا مثلما ينطبق الإطار الزمني الملائم.

ينقلنا ذلك إلى عامِل آخَر يُصعِّب من حساب المخاطر والتعامل معها؛ أَلَا وهو أن النفس البشرية والنظم السياسية ونظم السوق تطبِّق منطقًا مختلفًا فيما يتعلَّق بالمخاطر الطويلة والقصيرة المدى، ويتَّخِذ ذلك أسلوبًا متعقِّلًا أحيانًا، لكنه في الغالب يكون جشعًا. أدرك معظم الاقتصاديين وبعض العاملين في الأسواق المالية أن فقاعات السوق لن تستمر لأَجَلٍ غير مسمًّى، فلم يكمن الخطر في احتمال انفجار الفقاعات — فهل من أحد يظن حقًّا أن أسعار المساكن ستستمر في التضاعف في الأطر الزمنية القصيرة إلى الأبد؟ — وإنما في احتمال انفجارها في المستقبل القريب. والتعامل مع الفقاعة أو تكبيرها — حتى تلك التي نعلم بأنها غير مستمرة — لا ينطوي على قصر نظر بالضرورة إذا كنت متأهِّبًا في أي لحظة لجمع الأرباح (أو المكافآت) ووقف عملك.

أما فيما يتعلق بموضوع تغيُّر المناخ، فلا يعرف العلماء كيفية تعيين رقم محدَّد لمعدل ذوبان غطاء جرينلاند الجليدي، وتكون الاحتمالات أقل يقينًا في حال تناولنا احتمال بدء ذوبان هذا الغطاء في إطار زمني محدَّد، على سبيل المثال، خلال السنوات المائة القادمة. لكن عدم معرفة الأرقام ليس مبرِّرًا لدفن رءوسنا في الرمال.

يتعذَّر علينا الوصول إلى إجماع بشأن المخاطر الناجمة عن تغيُّر المناخ، وكيفية تجنُّبها وتوقيت فعل ذلك عندما تتوالى العواقب البيئية المحتملة على نحو بطيء نسبيًّا، هذا فضلًا عن أننا لا نعرف كيفية تقدير التكلفة التي ينطوي عليها اتخاذ قرار ما من عدمه. لكن في حال وقوع حدث مهم بفعل المناخ، سنتخذ على الأرجح إجراءً على الفور. وبالطبع، بغض النظر عن سرعتنا في اتخاذ هذا الإجراء، سيكون متأخرًا في هذه الحالة، ومعنى ذلك أنه يجدر بنا العناية بالتغيرات المناخية غير الكارثية أيضًا.

لكن حتى عندما نعرف احتمالية نتائج معينة، فإننا ننزع لتطبيق معايير مختلفة مع الأحداث البعيدة الاحتمال ذات النتائج الكارثية عن تلك التي نطبقها مع الأحداث العالية الاحتمال ذات النتائج الأقل خطورةً. فما نسمع عنه من حوادث تحطُّم الطائرات

والهجمات الإرهابية أكثر بكثير مما نسمعه عن حوادث السيارات، رغم أن الأخيرة تتسبَّب في مقتل عدد أكبر من الناس كل عام. تحدَّثَ الناس أيضًا عن الثقوب السوداء حتى دون إدراك الاحتمالات؛ وذلك لأن عواقب السيناريو الكارثي في هذه الحالة بَدَا رهيبًا. على الجانب الآخَر، يُغضُّ الطرف تمامًا عن العديد من الاحتمالات البسيطة (وأيضًا غير البسيطة)؛ لأن عدم وضوحها يجعلها خارجَ نطاقِ المراقبة تمامًا. ومثال على ذلك، الحفر داخل المياه الذي كان الكثيرون يرونه آمنًا تمامًا إلى أن وقعت كارثة خليج المكسيك بالفعل.[3]

من المشكلات ذات الصلة أيضًا أن أهم الفوائد أو التكاليف تنتج عن أكثر الاحتمالات استبعادًا؛ أي الأحداث الأقل احتمالًا والتي لا نعرف عنها سوى القليل.[4] ونحن نرغب، في الأوضاع المثالية، في أن تُحدَّد حساباتنا على نحو موضوعي بواسطة التقديرات المتوسطة المدى أو متوسطات المواقف ذات الصلة الموجودة مُسبَقًا. لكن هذه البيانات لا تتوفَّر لدينا إذا لم يقع حدث مشابه قطُّ من قبلُ، أو إذا تجاهلنا الاحتمالية كليةً. وإذا كانت تكاليف هذه الاحتمالات البعيدة أو فوائدها عاليةً بما فيه الكفاية، فإنها تسيطر على التنبؤات، بافتراض أنك تعرف مسبقًا ماهيتها قبل كل شيء. وفي جميع الأحوال، لا تسري الأساليب الإحصائية التقليدية عندما تكون المعدلاتُ منخفضةً للغاية مما يَحُول دون أن تكون المتوسطات ذات معنى.

وقعت الأزمة المالية جرَّاء أحداث كانت خارج نطاق ما أخذه الخبراء في الاعتبار، وحقَّقَ الكثير من الناس أرباحًا بناءً على الجوانب المتوقَّعة، بَيْدَ أن الأحداث غير المحتملة حدَّدت بعضًا من التطورات الأكثر سلبيةً. وعند وضع نماذج لموثوقية الأدوات المالية، استخدم أغلب الناس البيانات المستمَدَّة من الأعوام القليلة السابقة، دون إفساح المجال لاحتمالية انقلاب الاقتصاد رأسًا على عقب، أو تحوُّله بمعدل شديد الخطورة. وقد استندت عمليات التقييم الخاصة بتنظيم الأدوات المالية إلى إطار زمني قصير المدى، أدَّتِ الأسواق إلى زيادته فحسب. وحتى عند الإقرار باحتمال انهيار السوق، كانت القيم المفترضة للانهيار منخفضة للغاية مما حَالَ دون التنبؤ بالتكلفة الفعلية لافتقار الاقتصاد للتنظيم. لم يلتفت أحد في الواقع للأحداث «الأقل احتمالًا» التي ساهمت في وقوع الأزمة؛ ومن ثَمَّ فإن المخاطر التي كان من الممكن أن تكون واضحة في ظروف أخرى لم تُوضَع في الاعتبار مطلقًا. لكن حتى الأحداث غير المحتملة يلزم أخذها بعين الاعتبار عندما يمكن أن يكون لها أثر هائل.[5]

ثمة عقبة من شأنها إعاقة أي تقييم للمخاطر؛ أَلَا وهي صعوبة تقييم خطر عدم صحة الافتراضات الضمنية. وبدون هذه التقييمات، يصبح أي تقدير عرضةً للتحيُّزات الذاتية. وفي مقدمة المشكلات الحسابية والتحيُّزات الخفية الكامنة في هذه الافتراضات الضمنية تأتي مشكلة تضمُّن العديد من القرارات السياسية العملية لأمور غير معلومة؛ أي عوامل لا يمكن توقُّعها أو لم يتم توقُّعها. فلا يمكننا في بعض الأحيان التنبؤ بدقة بالأحداث غير المحتملة التي من شأنها التسبب في مشكلات. ويمكن لهذا الأمر أن يجعل أي محاولات للتنبؤ — التي ستفشل بالتأكيد في أن تأخذ في الحسبان هذه العوامل غير المعلومة — جداليةً للغاية.

الحد من المخاطر

لحسن حظنا في بحثنا الهادف للفهم، لدينا يقين تام بأن احتمالية تكوُّن ثقوبٍ سوداء خطيرةٍ ضئيلةٌ للغاية. ورغم أننا لا نعرف احتمالًا رقميًّا دقيقًا لأي نتيجة كارثية، فإننا لسنا بحاجة لذلك؛ لأنه احتمال مهمل للغاية؛ فأي حدث لن يقع ولو مرة واحدة في عمر الكون، يمكن غضُّ الطرف عنه دون أي ضرر في ذلك.

لكن، بوجه عام، تحديد حجم مستوى الخطر المقبول أمر صعب للغاية. فنحن نرغب بوضوح في تجنُّب المخاطر الكبيرة تمامًا؛ بمعنى تجنب أي شيء يعرض حياتنا، أو كوكبنا، أو أي شيء آخَر عزيزٍ علينا للخطر. وفيما يتعلَّق بالمخاطر التي يمكننا تحملها، نحتاج إلى وسيلة لتقييم مَن تعود عليه المنافِعُ ومَن يتكبَّد الخسائرَ، وإلى نظام يقيِّم المخاطر ويتنبَّأ بها وفقًا لذلك.

علَّق محلِّل المخاطر جو فراجولا على تغيُّر المناخ، إلى جانب المخاطر الأخرى المحتملة التي يعنى بها، قائلًا لي: «إن المشكلة الحقيقية لا تكمن فيما إذا كانت هذه المخاطر ستحدث بالفعل أم لا، ولا في عواقبها، وإنما في احتمالية حدوثها والشكوك المرتبطة بها. تكمن المشكلة، كذلك، في كمِّ مواردنا العالمية التي ينبغي تخصيصُها لمواجهة هذه المخاطر، ليس فقط بالاعتماد على احتمالية حدوثها، وإنما أيضًا على احتمالية فعلنا لشيء ما للحد منها.»

يعتمد واضعو اللوائح التنظيمية غالبًا على ما يُعرَف بتحليل التكاليف والفوائد لتقييم المخاطر وتحديد كيفية التعامل معها. ظاهريًّا، تبدو الفكرة بسيطة إلى حدٍ ما؛

فما عليك سوى حساب ما عليك دفعه مقابل الفائدة التي ستعود عليك، وستعرف ما إذا كان التغيير المُقترَح يستحق ما ستبذله من جهد أم لا. قد يكون ذلك أفضل الإجراءات المتاحة في ظل العديد من الظروف، لكنه قد يُسفِر أيضًا عن تكوُّن غشاوة خادعة من الدقة الرياضية؛ فمن الناحية العملية، قد يكون من الصعب للغاية إجراءُ تحليل التكاليف والفوائد. ولا تقتصر المشكلة على قياس التكاليف والفوائد فحسب — الأمر الذي قد يمثِّل تحديًا في حد ذاته — وإنما تشمل أيضًا تعريف ما نعنيه بالتكلفة والفائدة في المقام الأول. يتضمن العديد من المواقف الافتراضية الكثير من الأمور غير المعلومة التي تَحُول دون حساب أيٍّ من التكلفة أو الفائدة على نحو موثوق، بل حساب المخاطر في المقام الأول أيضًا. لا ريب أنه بوسعنا المحاولة، إلا أن هذه الشكوك ينبغي أخذها في الاعتبار، أو على الأقل الإقرار بها.

ولا شك أن أي نظام متعقِّل يتوقَّع التكاليفَ والمخاطِرَ على المدى القريب وفي المستقبل سيكون نافعًا، لكن لا يمكن تقييم جميع البدائل بناءً على تكلفتها فحسب؛ فماذا إذا كان الشيء المعرَّض للخطر ليس له بديل على الإطلاق؟[6] فلو كان تكوين مصادم الهادرونات الكبير لثقبٍ أسودَ من شأنه ابتلاع كوكب الأرض، أمرًا ذا احتماليةِ حدوثٍ معقولةٍ على مدى أعمارنا، أو حتى على مدى مليون عام، لَكُنَّا بلا شك قد أوقفنا المشروع على الفور.

رغم استفادتنا إلى حدٍّ بعيد، في النهاية، من الأبحاث في مجال العلوم الأساسية، نادرًا ما يمكن حساب التكلفة الاقتصادية للتخلِّي عن مشروع ما في هذا المجال؛ وذلك لأن الفوائد التي يعود بها يصعب للغاية تحديد حجمها. على سبيل المثال، من أهداف مصادم الهادرونات الكبير التوصُّل إلى معرفة أساسية تشمل فهمًا أفضل للكتل والقوى، وربما أيضًا طبيعة الفضاء. من فوائده أيضًا الجمع بين مجموعة من الأفراد المدربين فنيًّا الذين يتمتعون بالثقافة والحماس، ولديهم أسئلة مهمة وأفكار عميقة بشأن الكون وتكوينه. على الجانب الأكثر عمليةً، سوف يتبع هذا المصادم نهجَ التقدُّم المعلوماتي الذي حقَّقَتْه سيرن في الشبكة العنكبوتية العالمية، تلك «الشبكة» التي سمحت بمعالجة عالمية للمعلومات، إلى جانب التطورات في تكنولوجيا المغناطيسيات التي انتفعت بها الأجهزة الطبية، مثل أجهزة التصوير بالرنين المغناطيسي. يمكن التوصُّل أيضًا إلى العديد من التطبيقات الأخرى المحتملة للعلم الأساسي، لكن هذه التطبيقات يستحيل غالبًا التنبؤ بها.

إن تحليلات التكاليف والفوائد يصعب تطبيقها على العلم الأساسي. طبَّق أحدُ المحامين على نحو هزليٍّ أسلوبَ تحليل التكاليف والفوائد على مصادم الهادرونات الكبير، مشيرًا إلى أنه في مقابل الخطر الهائل ذي الاحتمال الضعيف للغاية الذي يفرضه هذا المصادم، أمامه في الوقت نفسه فرصةٌ ضئيلةٌ لتحقيق فوائد مذهلة عن طريق حلِّه لجميع مشكلات العالم. بالطبع، لا يتلاءَمُ أيٌّ من هاتين النتيجتين بسهولة مع حساب التكاليف والفوائد القياسي، وإنْ حاوَلَ المحامون — على نحو لا يُصدَّق — فعل ذلك.[7]

يستفيد العلم، على الأقل، من كَوْن أهدافه حقائق «أبدية»، فإذا توصَّلتَ إلي الكيفية التي يسير بها العالم، فستكون تلك حقيقة بغض النظر عن مدى السرعة أو البطء التي تم بها هذا الإنجاز. ونحن، بلا شك، لا نرغب في أن يكون التقدم العلمي بطيئًا، إلا أن التأخُّر الذي شهده مصادم الهادرونات الكبير لمدة عام أوضَحَ لنا خطورةَ التسرُّعِ في تشغيله. وبوجه عام، يحاول العلماء التقدُّم بحذر.

يتَّسِم تحليل التكاليف والفوائد بصعوبة إجرائه في أغلب المواقف المعقَّدَة، مثل سياسة تغيُّر المناخ أو العمل المصرفي. ورغم أن تحليل التكاليف والفوائد — من الناحية النظرية — منطقي وقد لا يكون هناك اعتراض جوهري عليه، فإن كيفية تطبيقه هي التي تُحدِث فارقًا هائلًا. مناصرو تحليل التكاليف والفوائد يتبعون منطق التكلفة والفائدة في دفاعهم من أجل تبرير هذا الأسلوب بطرحهم السؤال التالي: كيف يمكن تحقيق ما هو أفضل من هذا التحليل؟ ولعلهم على حق في ذلك. لكن ما أدعو إليه هو تحرِّي المزيد من الدقة العلمية عند تطبيق هذا الأسلوب؛ فعلينا التفكير بوضوح في الشكوك التي قد ينطوي عليها أي رقم نطرحه. وكما هو الحال مع التحليل العلمي، علينا الأخذ في الاعتبار الأخطاء والافتراضات والأهواء، وأن نتحلَّى بالصراحة في التعبير عن هذه العوامل.

من العوامل التي تهم كثيرًا في قضايا تغيُّر المناخ فكرةُ ما إذا كانت التكاليف أو الفوائد تعود على فرد، أم دولة، أم العالم بأسره. يمكن للتكاليف أو الفوائد المحتملة تجاوُز هذه الفئات أيضًا، لكننا لا نأخذ دائمًا ذلك بعين الاعتبار. على سبيل المثال، من الأسباب التي دفعت السياسيين الأمريكيين إلى التصويت ضد بروتوكول كيوتو توصُّلهم إلى أن التكاليف التي سيكبِّدها هذا البروتوكول للأمريكيين — وبالأخص الشركات الأمريكية — ستتجاوز فوائده. لكن هذه الحسابات لم تأخذ في الاعتبار التكاليفَ الطويلة المدى لحالات عدم الاستقرار المناخي بجميع أنحاء العالم، أو فوائد البيئة المنظمة التي

قد تزدهر فيها الأعمال الجديدة. الكثير من التحليلات الاقتصادية لتكاليف الحد من تغيُّر المناخ لا تأخذ في الاعتبار الفوائدَ الأخرى المحتملة التي ستعود على الاقتصاد عن طريق الابتكار، أو على الاستقرار عن طريق تراجع الاعتماد على الدول الأجنبية. ويتدخل في ذلك العديد من الأمور المجهولة بشأن كيفية تغيُّر العالم.

تثير هذه الأمثلة، كذلك، تساؤلًا بشأن كيفية تقييم المخاطر التي تتجاوز حدود الدول، والحد منها. لنفترض مثلًا أن الثقوب السوداء فرضت خطرًا على الكوكب بالفعل، فهل يمكن لشخص ما في هاواي التقدم بدعوى قضائية ناجحة ضد تجربةٍ خُطِّطَ لها في جنيف؟ وفقًا للقوانين المعمول بها، فإن الإجابة هي: لا، لكن ربما يمكن لدعوى قضائية ناجحة التدخُّل في المساهمات المالية التي تقدِّمها الولايات المتحدة لهذه التجربة.

يُعَدُّ الانتشار النووي من القضايا الأخرى التي يكون فيها الاستقرار العالمي على المحك، لكن تحكمنا في المخاطر التي تظهر في الدول الأخرى محدودٌ. فكلٌّ من تغيُّر المناخ والانتشار النووي من القضايا التي تُدار على مستوى الدولة، لكن مخاطرها لا تقتصر على المؤسسات أو الدول التي تتسبَّب في الخطر فحسب. والمشكلةُ السياسية المتعلقة بما ينبغي فعله عند تجاوز المخاطر حدود الدول أو الاختصاصات القانونية مشكلةٌ صعبةٌ، لكنها بالتأكيد ذات أهمية.

على سبيل المثال، بما أن سيرن مؤسسة دولية بمعنى الكلمة، فإن نجاحها يعتمد على الأهداف المشتركة للعديد من الدول، ويمكن لإحدى الدول أن تحدَّ من قدر مساهمتها في المنظمة، لكن بعيدًا عن ذلك، لا تكون أي مصالح فردية عرضة للخطر. فتعمل جميع الدول بالتعاون مع بعضها البعض؛ نظرًا لأن العلم الذي تقدِّره جميع هذه الدول واحد. ولعل الدولتين اللتين يقع بهما مقر المنظمة، وهما فرنسا وسويسرا، يحصلان على قدر أكبر بعض الشيء من المزايا الاقتصادية فيما يتعلق بالأيدي العاملة والبنية التحتية، لكن ذلك لا يحدث — بوجه عام — على حساب أي دولة أخرى من الدول الأعضاء، فما من دولة تستفيد على حساب أخرى.

من الميزات الأخرى الجديرة بالذكر لمصادم الهادرونات الكبير تحمُّل سيرن ودُوَلها الأعضاء المسئولية في حال وقوع أي مشكلات فنية أو عملية. لزم، على سبيل المثال، إصلاح ما تسبَّبَ فيه انفجارُ الهليوم عام ٢٠٠٨ باستخدام ميزانية سيرن. ما من أحدٍ يستفيد، بالتأكيد، من الفشل الميكانيكي أو الكوارث العلمية، لا سيما مَن يعملون في مصادم الهادرونات الكبير. وتقل فائدة تحليلات التكاليف والفوائد عند تطبيقها على

المواقف التي لا يوجد فيها توازن كامل بين التكاليف والفوائد، ولا يتحمل فيها مانِحُو الفوائد المسئوليةَ كاملةً عن المخاطر التي يتسبَّبون فيها. وذلك يختلف تمامًا عن تطبيق هذا النوع من التفكير على صور النظم المُغلَقة التي يحاول العلم التعامُل معها.

وما نبغيه دومًا في أي موقف هو تجنُّب المخاطر الأخلاقية، حين لا يكون هناك توازنٌ بين مصالح الناس والمخاطر التي يتعرَّضون لها، مما يهيئ لديهم الحافِزَ لتحمُّل خطرٍ أكبر مما كانوا سيقبلونه حال لم يقدِّم أحدٌ آخَر ضمانًا أكبر؛ لذا فإننا بحاجة إلى الهياكل التحفيزية السليمة.

انظر مثلًا إلى صناديق التغطية؛ يحصل الشركاء العموميون على نسبة من المكسب كل عام عند تحقيق هذه الصناديق للأرباح، لكنهم لا يتحملون نسبةً مماثلةً في حال واجهت صناديقهم أي خسائر أو أفلست. وبذلك، يحتفظ الأفراد بمكاسبهم، في حين يتحمَّل أربابُ أعمالهم — أو دافِعُو الضرائب — الخسائرَ. وفي ظل هذه المؤشرات، حتى أكثر الاستراتيجيات نفعًا للموظفين تؤدِّي إلى حدوث حالات تقلُّب وعدم استقرار هائلة. ولكي يكون النظام فعَّالًا، وكذا تحليل التكاليف والفوائد، ينبغي أن يضَعَا في الاعتبار مثلَ هذا التخصيص للمخاطر والمكافآت والمسئوليات، وينبغي أن يأخذَا في الحسبان الفئاتِ أو النطاقاتِ المختلفةَ للأفراد المَعْنيِّين.

تنطوي العمليات المصرفية أيضًا على مخاطر أخلاقية واضحة لا تتوازن بالضرورة مع الفوائد، فتُسفِر سياسة «هذا أكبر من أن يفشل»، إلى جانب ضعف القيود المفروضة على رفع الأرباح المالية، عن موقف يختلف فيه مَن يتحمَّلون مسئولية الخسائر (دافِعُو الضرائب) عمَّن ينتفعون أغلب الوقت (المصرفيين وشركات التأمين). وقد يجادل البعض بشأن ضرورة عمليات الإنقاذ من الأزمة المالية التي اتُّبِعت في عام ٢٠٠٨، لكنه كان من الأفضل الحيلولة دون حدوث ذلك الموقف من الأساس عن طريق الموازنة بين المخاطر والمسئولية.

من ناحية أخرى، نجد جميع البيانات المتعلقة بالتجارب والمخاطر في مصادم الهادرونات الكبير متوفرة بسهولة، وتقرير السلامة متوفر بدوره على الإنترنت، حيث يمكن للجميع الاطِّلَاع عليه. فلا ريب أن أي مؤسسة تتوقَّع إنقاذًا لها في حال فشلها، أو حتى تأمل في ذلك على نحو غير مستقر، ينبغي أن تقدِّم البيانات الوافية إلى الجهات التنظيمية لكي يمكن تقييم الوزن النسبي للفوائد مقابل المخاطر. وهذا الوصول اليسير للبيانات الموثوقة من شأنه مساعدة خبراء الرهونات أو المنظمين أو غيرهم على توقُّع الكوارث المالية أو غيرها من صور الكوارث الأخرى مستقبلًا.

ومع أن أخذ «النطاق» في الاعتبار — من حيث الفئات التي ستجني الفوائد وتلك التي ستتحمل المخاطر، بالإضافة إلى الأطر الزمنية — ليس حلًّا في حد ذاته، فإنه يمثِّل أحدَ العوامل الأخرى التي يمكننا على الأقل تحسين التحليلات أو توضيحها. ومسألة النطاق تتناول مسألة مَن المعْنِيُّ بالحسابات: هل هو فرد، أم منظمة، أم حكومة، أم العالم أجمع؟ وما إذا كانت الفترة الزمنية المعنيَّة بالحساب شهرًا أم عامًا أم عقدًا. ولعل السياسة الجيدة، كما يراها جولدمان ساكس، قد لا تفيد في النهاية الاقتصاد ككل، أو الفرد الذي يواجه مشكلة ما في رهنه العقاري حاليًّا. ويعني ذلك أنه حتى في وجود حسابات دقيقة للغاية، فإنها لن تضمن نتيجة صحيحة إلا إذا طُبِّقَتْ على فكر متأنٍّ سليم عن طريق التساؤل.

وعندما نضع سياسة أو نقيِّم التكاليف مقابل الفوائد، نتجاهل عادةً الفوائد المحتملة للاستقرار العالمي ومساعدة الآخَرين، ليس فقط على المستوى الأخلاقي، وإنما أيضًا على المستوى المالي الطويل المدى. ويرجع ذلك، من ناحية، إلى أن هذه المكاسب يصعب تحديد حجمها، ومن ناحية أخرى إلى صعوبة إجراء التقييمات ووضع لوائح قوية في عالم سريع التغير. ومع ذلك، يظل من الواضح أن اللوائح التي تضع في الاعتبار جميعَ الفوائد الممكنة، وليس فقط تلك التي تعود على فرد أو مؤسسة أو دولة ما، تكون أكثر موثوقيةً، بل قد تؤدي كذلك إلى العيش في عالم أفضل.

يمكن للإطار الزمني أيضًا التأثير على التكلفة أو الفائدة المحسوبة للقرارات المتعلقة بسياسة ما، مثلما تفعل الافتراضات التي تضعها الأطراف التي تتخذ القرارات، كما رأينا في الأزمة المالية الأخيرة. والأطر الزمنية مهمة من نواحٍ أخرى أيضًا؛ نظرًا لأن التصرف على نحو سريع للغاية يمكن أن يزيد من الخطر، وفي الوقت ذاته يمكن للمعاملات السريعة زيادة الفوائد (أو الأرباح). لكن بالرغم من أن عمليات المتاجرة السريعة يمكن أن تجعل التسعير أكثر كفاءةً، فإن المعاملات التي تتم بسرعة البرق لا تعود بالضرورة بالفائدة على الاقتصاد ككل. وقد أوضح لي أحد المصرفيين العاملين في مجال الاستثمار كَمْ كان من المهم بيع الأسهم وقتما يشاء مالكوها، لكنه لم يتمكَّن من تفسير سبب حاجتهم لبيع هذه الأسهم بعد امتلاكها لبضع ثوانٍ أو أقل، فيما عدا حقيقة جَنْيِه هو ومصرفه المال من وراء ذلك. مثل هذه العمليات التجارية تحقِّق قدرًا أكبر من الأرباح للمصرفيين ومؤسساتهم على المدى القصير، لكنها تزيد من تفاقُم نقاط الضعف التي يعاني منها بالفعل القطاعُ المالي على المدى الطويل. حتى في ظل الضرر التنافسي القصير

المدى، يمكن للنظام، الذي يبعث على الثقة، أن يكون أكثر تحقيقًا للربح على المدى الطويل؛ ومن ثَمَّ تكون الغلبة له في النهاية. جدير بالذكر أن المصرفي، الذي أتحدَّث عنه، قد جنى مليارَيْ دولار لصالح مؤسسته في عام واحد؛ لذلك قد لا تتفق هذه المؤسسة مع الحكمة التي يحملها اقتراحي. لكن مَن سيتكبَّد في النهاية تكلفة هذا الربح قد يتفق معي.

دور الخبراء

يخطئ الكثيرون في استيعاب الدرس، ويستنتجون أن غياب التنبؤات الموثوقة يعني غياب الخطر. لكن، في الواقع، العكس هو الصحيح؛ فإلى أن يمكننا استبعاد افتراضات أو أساليب معينة، تظل النتائج الممكنة واقعة داخل نطاق احتمالية الحدوث. ورغم الشكوك المتعلقة بالنماذج العديدة التي تتنبَّأ بالنتائج الخطيرة — أو ربما بسبب هذه الشكوك — فإن احتمالية وقوع كارثة فيما يتعلق بالمناخ أو الاقتصاد — أو الحفر داخل المياه — ليست ضئيلة على نحو يمكن إهماله. وقد يزعم البعض أن فُرَص هذه المخاطر تكون ضئيلة في إطار زمني محدَّد. لكن على المدى الطويل، وإلى أن نحظى بمعلومات أفضل، يؤدي العديد من السيناريوهات إلى نتائج فاجعة يصعب معها تجاهل المخاطر.

والأشخاص الذين لا يهتمون إلا بالمحصلة النهائية يعارضون التنظيم الحكومي، في حين يؤيِّده مَن يهتمون بالسلامة والقابلية للتنبؤ. ويسهل للغاية الوقوع في شَرَك انتقاد هذا الطرف أو ذاك؛ نظرًا لأن معرفة الحدود الفاصلة بينهما أمر صعب، إن لم يكن مستحيلًا. وكما هو الحال مع حساب المخاطر، فإن عدم معرفة نقطة اتخاذ القرار لا يعني أنها غير موجودة، أو أنه ليس علينا محاولة الوصول إلى أفضل تقدير تقريبي لها؛ معنى ذلك أنه حتى في ظل عدم توفُّر المعلومات الدقيقة اللازمة لإجراء تنبؤات مفصلة، ينبغي معالجة المشكلات الهيكلية.

ينقلنا ذلك إلى السؤال الأخير المهم وهو: مَن بيده القرار؟ ما دور الخبراء؟ ومَن يتولَّى تقييم المخاطر؟

إذا وضعنا في الاعتبار الجانب المالي والبيروقراطية والمراقبة الدقيقة بمصادم الهادرونات الكبير، يمكننا توقُّع تحليل المخاطر كما ينبغي. علاوةً على ذلك، فإن الطاقات التي يعمل عندها المصادم لا تفرض علينا التعامُل مع نظام جديد لا تنطبق

عليه أُسُس فيزياء الجسيمات؛ لذا فإن الفيزيائيين على ثقة بأن المصادم آمِن، ويتطلعون إلى ما ستحقِّقه تصادمات الجسيمات من نتائج.

لا يعني ذلك أن العلماء لا تقع على عاتقهم مسئوليات جسيمة؛ فنحن بحاجة دومًا للتأكُّد من أن العلماء يتحملون مسئولية المخاطر ويتنبَّهون لها، كما أننا نبغي التمتُّع في جميع المشروعات العلمية بالقدر نفسه من اليقين الذي نتمتَّع به بشأن مصادم الهادرونات الكبير. فإذا كنتَ تعمل على مادة أو جراثيم أو أي شيء آخَر لم يوجد من قبلُ (أو تسبر أغوارًا أعمق أو تستكشف حدودًا جديدة على الأرض)، فعليك التيقُّن من أنك لا ترتكب خطأً فادحًا. والحل هنا هو التصرف على نحو عقلاني، دون أن تقيِّدَك مخاوف لا أساس لها من الصحة، من شأنها الوقوف حجر عثرة أمام تحقيق التقدم وجني الفوائد. ينطبق ذلك ليس فقط على العلم، وإنما على أي مسعًى آخَر محتمل الخطورة. والحل الوحيد للأمور المجهولة المُتوهَّمة، بل «الأمور المجهولة التي لا نراها» أيضًا، هو الاهتمام بأكبر قدر ممكن من وجهات النظر العقلانية، والتمتُّع بحرية التدخل إذا لزم الأمر. ينبغي كذلك أن تتمتَّع بقدرة إيقاف العمل برمته في حال وقوع أي مشكلات، الأمر الذي سيصدِّق عليه أي شخص شهد كارثة خليج المكسيك.

في بداية الفصل السابق، لخَّصْتُ بعضًا من الاعتراضات التي يطرحها المدونون والمتشكِّكون بشأن الأساليب التي يتبعها الفيزيائيون في حسابات الثقوب السوداء، ومن ذلك الاعتماد على ميكانيكا الكم. لقد استخدم هوكينج بالفعل ميكانيكا الكم في استنباط فكرة تحلُّل الثقوب السوداء، ورغم عبارة فاينمان «لا أحد يفهم ميكانيكا الكم»، فإن الفيزيائيين يفهمون آثارها، وإن لم نكن نتمتَّع ببصيرة فلسفية عميقة بشأن السبب وراء صحة ميكانيكا الكم. نحن نؤمن بها لأنها تمنحنا تفسيرًا للبيانات وتحلُّ لنا المشكلات التي لا سبيل لحلها باتباع الفيزياء الكلاسيكية.

عندما يتناقش الفيزيائيون حول ميكانيكا الكم، فإنهم لا يتجادلون بشأن ما تقدِّمه من تنبؤات؛ فنجاحها المتكرِّر أجبر أجيالًا من الباحثين والطلبة المنبهرين بها على قبول صحة النظرية، لكن الجدل المُثار حاليًّا بشأن ميكانيكا الكم إنما يتعلَّق بأسسها الفلسفية. والسؤال هنا: هل من نظرية أخرى ذات مقدمة منطقية كلاسيكية مألوفة على نحو أكبر تتنبَّأ بفرضيات ميكانيكا الكم الغريبة؟ حتى إن حقَّقَ الناس تقدُّمًا بشأن هذه المسائل، فلن يُحدِث ذلك اختلافًا في تنبؤات ميكانيكا الكم، فيمكن لصور التقدُّم

الفلسفي أن تؤثِّر على إطار العمل المفاهيمي الذي نستخدمه لوصف التنبؤات، ولكن ليس على التنبؤات ذاتها.

من الجدير بالذكر أن تحقيق تقدُّم مهم في هذا الشأن أمر مستبعد من وجهة نظري؛ فميكانيكا الكم هي على الأرجح نظرية أساسية، وهي أكثر ثراءً من الميكانيكا الكلاسيكية. وجميع التنبؤات الكلاسيكية حالة مقيدة لميكانيكا الكم، لكن العكس ليس صحيحًا؛ لذا من الصعب أن نصدِّق أننا سنفسِّر في النهاية ميكانيكا الكم باستخدام منطق نيوتن الكلاسيكي؛ فمحاولة تفسير ميكانيكا الكم باتباع الأسس الكلاسيكية أشبه بمحاولتي تأليفَ هذا الكتاب باللغة الإيطالية، كل ما يمكنني قوله بالإيطالية يمكنني قوله بالإنجليزية، لكن العكس ليس صحيحًا بالمرة؛ فأنا لا أعرف سوى عدد محدود من المفردات الإيطالية.

مع ذلك، سواء أكان هناك اتفاق على الدلالة الفلسفية أم لا، فإن جميع الفيزيائيين يتَّفِقون على كيفية تطبيق ميكانيكا الكم، حتى المعترضون اللاعقلانيون أنفسهم يتفقون على هذه النقطة؛ فتنبؤات ميكانيكا الكم جديرة بالثقة، وخضعت لاختبار صحتها مرات عديدة. حتى دون هذه التنبؤات، تظل لدينا أدلة تجريبية بديلة بأن مصادم الهادرونات الكبير آمِن (تتمثَّل في الأرض والشمس والنجوم النيوترونية والأقزام البيضاء).

اعترض المتخوفون من مصادم الهادرونات الكبير كذلك، على الاستخدام المزعوم لنظرية الأوتار. لا ريب أن استخدام ميكانيكا الكم أمر لا بأس به، لكن الاستناد إلى نظرية الأوتار ليس كذلك. بَيْدَ أن الاستنتاجات بشأن الثقوب السوداء لم تَقُمْ بأي حال على نظرية الأوتار على الإطلاق. يحاول الناس بالفعل استخدام نظرية الأوتار لفهم الجانب الداخلي للثقوب السوداء (أي هندسة التفرُّد الواضح بمركز هذه الثقوب؛ حيث تصير الطاقة كثيفةً على نحو غير محدود وفقًا للنسبية العامة)، وأُجرِيت حسابات مستندة إلى نظرية الأوتار لتبخُّر الثقوب السوداء في المواقف غير الفيزيائية، الأمر الذي دعم النتيجة التي توصَّلَ إليها هوكينج. لكن حساب تحلُّل الثقوب السوداء يعتمد على ميكانيكا الكم، وليس نظرية كاملة للجاذبية الكمية؛ لذلك حتى دون نظرية الأوتار، كان بإمكان هوكينج إجراء حساباته. والأسئلة التي طرحها بعض المدونين عكست في حدِّ ذاتها غيابَ الفهم العلمي الكافي لتقدير الحقائق.

ثمة تفسيرٌ آخَر أكثر شمولًا لهذا الاعتراض؛ أَلَا وهو مناهضة العلماء وثقتهم «القائمة على الإيمان» في نظرياتهم، وليس مناهضة العلم ذاته. ففي النهاية، تتجاوَزُ

نظرية الأوتار نظام الطاقات الذي يمكن التحقُّق منه تجريبيًّا، لكن الكثير من الفيزيائيين يؤمنون بصحتها ويواصلون العمل عليها. لكن اختلاف الآراء بشأن هذه النظرية — حتى داخل المجتمع العلمي نفسه — يثبت عكس ذلك؛ فما من أحد سيستند في أي تقييم للسلامة إلى نظرية الأوتار. يدعم بعض الفيزيائيين النظرية، في حين لا يفعل ذلك البعض الآخَر، لكن الجميع يعلم أنه لم يتم إثباتها أو الكشف عن كافة تفاصيلها بعدُ. وإلى أن يتفق الجميع على صحة نظرية الأوتار وموثوقيتها، ستكون الثقة بها بالمواقف الخطيرة مجازَفَةً حمقاء. وفيما يتعلق بسلامتنا، فإن العجز عن التوصُّل إلى نتائج تجريبية لنظرية الأوتار ليس هو السبب الوحيد وراء عدم تأكدنا بعدُ من صحتها، ولكنه السبب أيضًا وراء عدم الحاجة إليها في التنبؤ بأغلب ظواهر العالم الواقعي التي نواجِهُها على مدار أعمارنا.

مع ذلك، ورغم ثقتي بأنه من المقبول الاعتماد على الخبراء عند تقييم المخاطر المحتملة لمصادم الهادرونات الكبير، فإنني أدرك مَواطِن القصور المحتملة لهذه الاستراتيجية، ولا أعلم بالضبط كيفية معالجتها؛ فقد كان «الخبراء» هم مَن أخبرونا أن المشتقات المالية من شأنها الحد من المخاطر، وليس التسبُّب في أزمات محتملة. والاقتصاديون «الخبراء» هم مَن أخبرونا بأن إلغاء اللوائح المنظمة لعمل الاقتصاد ضروريٌّ لتحقيق التنافسية في سوق العمل الأمريكية، ليس أنه سيتسبَّب في انهيار محتمل للاقتصاد الأمريكي. و«الخبراء» هم مَن أخبرونا أن مَن يعملون في القطاع المصرفي هم وحدهم مَن يستوعبون ما يجرونه من معاملات على نحو يسمح لهم بالتعامل مع كوارثها. كيف لنا إذن معرفة ما إذا كان الخبراء يفكِّرون تفكيرًا شموليًّا بالقدر الكافي أم لا؟

يتضح مما سبق أن الخبراء يمكن أن يتَّسِموا بقِصَر النظر، ويمكن كذلك أن يكون لديهم تضارُبٌ في المصالح؛ فهل من دروس يمكن أن يقدِّمها لنا العلم في هذا الشأن؟

لا أظن أن انحيازي هو ما يدفعني للقول إنه في مسألة الثقوب السوداء بمصادم الهادرونات الكبير، تحقَّقْنا نحن العلماء من مجموعة عريضة من المخاطر المحتملة التي يمكننا تصوُّرها منطقيًّا. فلقد فكَّرنا في الحُجج النظرية والأدلة التجريبية على حدٍّ سواء، وفكَّرنا في المواقف الكونية التي تنطبق عليها نفس الظروف الفيزيائية، لكن لم يحدث تدمير لأي بِنى قريبة منها.

ليته كان بإمكاننا التفاؤل بأن الاقتصاديين يجرون مقارناتٍ مماثِلةً للبيانات المتوفرة لديهم. لكن عنوان كتاب كارمين راينهارت وكينيث روجوف «هذه المرة مختلفة»

يشير إلى عكس ذلك؛ فرغم أن الظروف الاقتصادية لا تتطابق أبدًا، فإن بعض السمات العامة تكرِّر نفسها في الفقاعات الاقتصادية.

أيضًا لا تصلح الحجة التي يطرحها البعض حاليًّا — والقائلة بأنه ما كان لأحد أن يتنبَّأ بمخاطر إلغاء اللوائح التنظيمية — كدفاع؛ فقد أشارت بروكسلي بورن — رئيسة مجلس إدارة «لجنة متاجرة العقود الآجلة للسلع» التي تُشرِف على العقود الآجِلة وأسواق خيارات السلع — بالفعل لمخاطر إلغاء اللوائح التنظيمية، بل إنها في الواقع دعَتْ لاستكشاف المخاطر المحتملة على نحو عقلاني، لكن الجميع رفض الاستماع إليها. لم يكن هناك تحليل موثوق بشأن ما إذا كان الحذر مبررًا (الأمر الذي أُثبِتت صحته بعد ذلك)، لكن وجهة النظر المناصرة لإلغاء اللوائح التنظيمية أشارت إلى أن التحرُّك ببطء سيضر بالأعمال (مثل الإضرار ببورصة وول ستريت على المدى القصير).

إن الاقتصاديين الذين يتحدَّثون بشأن اللوائح التنظيمية والسياسات قد تكون لديهم مصالح سياسية أو مالية من شأنها التدخل في فعل الصواب. في المعتاد، يولي العلماء مزيدًا من الاهتمام بفوائد المجادلات، بما في ذلك تلك التي تتعلَّق بالمخاطر، وليس بالسياسات؛ فنجد الفيزيائيين في مصادم الهادرونات الكبير يطرحون استفسارات علمية خطيرة لضمان عدم وقوع أي كوارث.

لعل الخبراء الماليين وحدهم هم الذين يفهمون تفاصيل أداة مالية معينة، لكن بمقدور أي شخص تفهُّم بعض المشكلات الهيكلية الأساسية. فأغلب الناس يمكنهم فهم السبب وراء عدم استقرار الاقتصاد القائم على رفع الأرباح بشكل مفرط، حتى دون التنبُّؤ على وجه الدقة بالمؤثِّر الذي من شأنه إحداث انهيار، أو فهم هذا المؤثر. ويمكن لأي أحد تقريبًا إدراك أن مَنْح المصارف مئاتِ المليارات من الدولارات مع قيود بسيطة أو دون قيود على الإطلاق، ليس السبيل الأمثل لإنفاق أموال دافعي الضرائب. وإذا ضربنا مثلًا بالصنبور، فسنجد أن أي صنبور يُصمَّم مزوَّدًا بوسيلة لإغلاقه، أو على الأقل توجد معه ممسحة وإرشادات لتنظيف أي فوضى ناجمة عن تسرُّب المياه. في ضوء هذا المثال، يصعب علينا فهم لماذا لا تُطبَّق تدابيرُ مماثلةٌ على معدات حفر البترول في المياه العميقة.

من ناحية أخرى، تتدخَّل العوامل النفسية عندما نعتمد على الخبراء، وهذا ما أوضحه الصحفي الاقتصادي ديفيد ليونهارت بصحيفة «نيويورك تايمز» في عام ٢٠١٠، عندما عزا الأخطاء التي ارتكبها السيد جرينسبان والسيد بيرنانكي إلى عوامل «نفسية أكثر منها اقتصادية». فسَّر ليونهارت ذلك بقوله: «لقد حصَرَا نفسَيهما في

إطار المعرفة التقليدية، ووقَعَا فريسة نقطة الضعف ذاتها التي عانَى منها المهندسون في مكوك الفضاء «تشالينجر»، والمخططون لحربَيْ فيتنام والعراق، والطيارون الذين ارتكبوا أخطاءً فادحة في كبائنهم داخل الطائرات. لم يتحقَّق جرينسبان وبيرنانكي من افتراضاتهما على النحو الملائم، وكان الأمر برمته خطأً بشريًّا.»[8]

إن السبيل الوحيد للتعامل مع المشكلات المعقَّدَة هو الاستماع للجميع، حتى مَن هم خارج إطار العمل على المشكلة. على سبيل المثال، رغم قدرة المصرفيين المدفوعين بمصالحهم الشخصية على التنبؤ بإمكانية تعرُّض الاقتصاد للانهيار، فقد ارتضوا تجاهُلَ التحذيرات لأطول فترة ممكنة، لكن العلم ليس ديمقراطيًّا، بمعنى أن العلماء لا يجتمعون معًا ويصوتون على الإجابة الصحيحة، وإنما إذا كان لدى أحدهم وجهة نظر علمية سليمة، فسوف يُستمَع إليها في النهاية. ولا ريب أن الناس يلتفتون عادةً للاكتشافات والمعلومات الدقيقة التي يطرحها العلماء البارزون أولًا، لكن أي شخص مجهول يطرح وجهة نظر سليمة سيحظى بمَن يستمع إليه في النهاية.

وفي ظل وجود علماء مشهورين يجيدون الاستماع للآخَرين، يمكن أن يحظى المجهولون بالاهتمام بأفكارهم في الحال. هذا الذي مكَّن أينشتاين من تقديم نظرية هزَّتِ الأسسَ العلمية على الفور، وقد استوعب الفيزيائي الألماني ماكس بلانك تبعات أفكار أينشتاين عن النسبية، وكان بالمصادفة هو المسئول عن أهم دورية فيزيائية آنذاك.

وفي العصر الحالي، نستفيد كثيرًا من الانتشار السريع للأفكار عبر الإنترنت؛ فيمكن لأي فيزيائي كتابة بحثه ونشره بأرشيف الفيزياء في اليوم التالي. على سبيل المثال، عندما كان لوبوش موتل طالبًا جامعيًّا في جمهورية التشيك، تمكَّنَ من حلِّ مسألة علمية كان العالم الشهير روتجرز يعمل عليها آنذاك، وكان توم بانكس يهتم بالأفكار الجيدة، حتى إن صدرَتْ عن مؤسسة لم يسمع عنها من قبلُ قطُّ. لا يتمتَّع الجميع بهذه الدرجة من الانفتاح، لكن طالما أن هناك عددًا قليلًا من الناس يهتمون، فستدخل أي فكرة — طالما أنها جيدة وسليمة — حيِّزَ النقاش العلمي في النهاية.

بذل المهندسون والفيزيائيون في مصادم الهادرونات الكبير المالَ والوقتَ من أجل تحقيق السلامة. لقد أرادوا الاقتصاد قدر الإمكان، لكن شريطة ألَّا يكون ذلك على حساب الأمان أو الدقة، وحرصوا كذلك على التوازن بين مصالح الجميع؛ فالنتائج التي لا تصمد أمام اختبار الزمان لا تفيد أحدًا.

إن العملة المتداولة في العلم هي السمعة، وما من شيء يعوضها عند خسارتها.

التنبؤ

آمل الآن أن نكون قد اتفقنا جميعًا على أنه ما من شيء يدعو للقلق فيما يتعلَّق بالثقوب السوداء، فثمة أمور أخرى عديدة علينا القلق بشأنها. وفي حالة مصادم الهادرونات الكبير، فإننا نفكِّر في جميع الأمور الجيدة التي يمكنه تحقيقها، وهذا ما يجب علينا فعله؛ فالجسيمات التي سينتجها ستساعدنا في التوصُّل إلى إجابات عميقة وجوهرية عن الأسئلة المتعلقة بالبنية الأساسية للمادة.

بالعودة سريعًا إلى حديثي مع نيت سيلفر، يمكنني القول إنني أدركتُ مدى تميُّزِ موقفنا في مجال فيزياء الجسيمات. ففي هذا العلم، يمكننا حصر أنفسنا داخل نظم تتسم بقدر من البساطة يمكِّننا من استغلال الأسلوب المنهجي، ذلك الأسلوب الذي تستند فيه النتائج الجديدة إلى القديمة. وتنشأ تنبؤاتنا أحيانًا في النماذج التي نعلم أنها صحيحة بناءً على الأدلة المتوفرة. وفي حالات أخرى، نقوم بالتنبؤات استنادًا إلى النماذج التي لدينا من الأسباب ما يجعلنا نؤمن بأنها قد تكون موجودة، ونستخدم التجارب لفلترة الاحتمالات؛ عندئذٍ — حتى دون أن نعلم بعدُ ما إذا كانت هذه النماذج ستثبت صحتها أم لا — يمكننا التنبؤ بما سيكون عليه شكل الأدلة التجريبية في حال ما تحقَّقت الفكرة في العالم.

ويستغل فيزيائيو الجسيمات قدرتهم على الفصل وفقًا للنطاق. فنحن نعلم أن التفاعلات على نطاق صغير يمكن أن تختلف كليةً عن التفاعلات على نطاق كبير، لكنها تنعكس في تفاعلات النطاق الكبير على نحو محدَّد، مما يحقِّق الاتساق مع ما نعرفه بالفعل.

يختلف التنبؤ اختلافًا كليًّا في جميع الحالات الأخرى تقريبًا؛ ففي النظم المعقدة، يلزم علينا عادةً التعامل مع مجموعة متنوعة من النطاقات في آنٍ واحد. لا ينطبق ذلك على المنظمات الاجتماعية فحسب — مثل مصرف يتسبَّب فيه تاجرٍ غير مسئول في القضاء على استقرار المجموعة الدولية الأمريكية والاقتصاد ككل — لكن ينطبق أيضًا على العلوم الأخرى، ويمكن للتنبؤات في هذه الحالات أن تتنوع تنوعًا هائلًا.

على سبيل المثال، تشمل أهداف علم الأحياء التنبؤ بالأنماط البيولوجية، بل التنبؤ أيضًا بالسلوك الحيواني والبشري، لكننا لا نتمتع إلى الآن بفهم كامل لجميع الوحدات الوظيفية الأساسية أو التنظيم العالي المستوى الذي تحدث من خلاله العناصر الأولية آثارًا معقدة. علاوةً على ذلك، فإننا لا نعرف جميع حلقات التغذية الراجعة التي تهدِّد

بجعل فصل التفاعلات حسب النطاق أمرًا مستحيلًا. يمكن للعلماء وضع النماذج، لكن بدون فهم أفضل للعناصر الأساسية المهمة أو كيفية مساهمتها في السلوك الناشئ، يواجِه واضعو النماذج ورطةً فيما يتعلَّق بالحصول على البيانات وحساب الاحتمالات.

من التحديات الأخرى أن النماذج البيولوجية تُصمَّم لتتماشى مع البيانات المتوفرة بالفعل، لكننا لا نعلم القواعد حتى الآن، فنحن لم نتعرَّف بعدُ على جميع النظم المستقلة البسيطة، لذلك من الصعب معرفة أي النماذج صحيح، هذا إن وُجِد نموذج صحيح. عندما تحدَّثْتُ مع الزملاء من علماء الأعصاب، وصفوا لي نفس المشكلة، فدون مقاييس جديدة من الناحية النوعية، أفضل ما يمكن للنماذج فعله هو التوفيق بين جميع البيانات المتوفرة بالفعل. ونظرًا لأن جميع النماذج الناجحة يجب أن تتفق مع البيانات، يصعب أن نحدِّد على نحو حاسم أي الفرضيات الأساسية صحيح.

لقد استمتعتُ بحديثي مع نيت بشأن الأمور التي يحاوِل التنبُّؤ بها، ويُقدِّم العديد من الكتب الشهيرة حاليًّا فرضياتٍ جامحةً تطرح تنبؤات تصدق أحيانًا، ولا تصدق في أحيان أخرى، أما نيت فأكثر التزامًا بالجانب العلمي، وقد اشتهر في البداية لتنبؤاته الدقيقة بنتائج مباريات كرة البيسبول والانتخابات. استند نيت في تحليله إلى التقييمات الإحصائية الدقيقة لمواقف مماثلة وقعت في الماضي، مع تضمين متغيرات عديدة يمكنه إدارتها لتطبيق الدروس التاريخية بأكبر قدر ممكن من الدقة.

على نيت الآنَ أن يختار بحكمة المجال الذي سيُطبِّق عليه الأساليبَ التي يتبعها، لكنه يدرك أن العلاقات المترابطة التي يركِّز عليها يمكن أن تكون خادعةً في تفسيرها. فيمكنك مثلًا القول إن حريقًا بأحد المحركات تسبَّبَ في تحطُّم طائرةٍ ما، لكن ليس مستغربًا أن نجد أن الطائرة المتحطمة تحوي محرِّكًا محترقًا. ما السبب الأساسي حقًّا للتحطُّم؟ لعلك تواجِه المشكلة ذاتها عندما تربط بين الطفرة البيولوجية لجين ما ومرض السرطان، فهذه الطفرة لا تتسبَّب بالضرورة في المرض، حتى وإن ارتبطت به!

يدرك نيت المخاطر الأخرى المحتملة كذلك. فحتى في ظل الكميات الكبيرة من البيانات، يمكن للعشوائية والتشويش أن يعزِّزَا من المؤشرات المثيرة للاهتمام أو يقمعاها؛ لذا لا يتناول نيت في تنبؤاته موضوع الأسواق المالية أو الزلازل أو المناخ؛ وذلك لأنه على الرغم من احتمالية تنبُّئِه بالتوجهات العامة في هذه المجالات، فستنطوي التنبؤات القصيرة المدى على شكوك متأصلة فيها. يدرس نيت الآن مجالات أخرى ألقت أساليبُه الضوءَ عليها، مثل كيفية تحقيق أفضل توزيع للموسيقى والأفلام السينمائية، بالإضافة

إلى تساؤلات من قبيل قيمة كبار نجوم كرة السلة الأمريكية. لكن نيت يسلِّم أيضًا بأن عددًا قليلًا فقط من النظم يمكن قياسها على نحو دقيق للغاية.

ومع كل ذلك، قال لي نيت إن المتنبِّئين يجرون نوعًا آخَر من التنبؤات؛ أَلَا وهو التنبؤ بما سيحاول الناس التنبُّؤ به.

الفصل الثاني عشر

القياس والشك

إن الإلمام بالإحصائيات والاحتمالات، والاطمئنان لها، يساعد في تقييم القياسات العلمية، ناهيك عن تقييم الكثير من القضايا الصعبة التي ينطوي عليها عالمنا المعاصر الذي يتسم بالتعقيد. وقد تذكَّرتُ فضْلَ التفكير القائم على الاحتمالات منذ بضعة أعوام، عندما أُحبِط صديق لي عندما قلت له: «لا أعلم.» ردًّا على سؤال طرحه عليَّ عمَّا إذا كنتُ قد خطَّطْتُ لحضور إحدى الفعاليات مساءَ اليوم التالي أم لا. لحسن حظي، كان ذلك الصديق مقامرًا وذا نزعة رياضية؛ لذا بدلًا من الإصرار في حنق على الحصول على ردٍّ محدَّد، سألني عن الاحتمالات. ما أدهشني آنذاك أنني رأيتُ ذلك السؤال الأخير أيسر كثيرًا في التعامل معه، ورغم أن التقدير الاحتمالي الذي منحته إياه لم يكن سوى تخمين محض، فقد عكس الاعتبارات والشكوك المتصارعة داخلي على نحو أدق من الإجابة المحدَّدة بالإيجاب أو النفي، هذا فضلًا عن أنه بدا أكثر صدقًا.

منذ ذلك الحين وأنا أتبع هذا الأسلوب القائم على الاحتمالات مع الأصدقاء والزملاء عندما يعتقدون أنه ليس بوسعهم الرد على سؤال ما. وقد توصَّلْتُ إلى أن أغلب الناس — سواء أكانوا علماء أم لا — لديهم آراء قوية، لكن يمكن الرجوع فيها؛ ولذا يرتاحون عادةً للتعبير عنها باتباع الأسلوب القائم على الاحتمالات. على سبيل المثال، قد لا يعلم شخص ما إذا كان يرغب في حضور إحدى مباريات البيسبول يوم الخميس بعد ثلاثة أسابيع من الآن أم لا، لكنه يعلم أنه يحب لعبة البيسبول، ولا يعتقد أن لديه أي رحلات عمل في الفترة القادمة، لكنه متردِّد لأن موعد المباراة في منتصف الأسبوع. وهكذا، قد يوافِق على أنه سيحضر المباراة بنسبة احتمال ٨٠ في المائة، حتى وإن لم يُعْطِ إجابةً حاسمة بالموافقة. ورغم أن هذا الاحتمال ليس سوى تقدير، فإنه يعكس على نحو أدق توقُّعه الحقيقي — حتى إن قَدَّمه على الفور.

وفي المحادثة التي دارَتْ بيني وبين المخرج وكاتب السيناريوهات، مارك فيسنتي حول العلم وكيفية عمل العلماء، أشار مارك إلى أنه صُدِم بتردُّد العلماء في إصدار تصريحات باتَّة وقاطعة مثلما يفعل أغلب الناس. إن العلماء ليسوا أكثر الناس وضوحًا بالضرورة، لكنهم يهدفون للتعبير بدقة عمَّا يعرفون ويفهمون وما لا يعرفونه ويفهمونه، على الأقل عند التحدُّث في مجال خبرتهم؛ ومن ثَمَّ فإنهم نادرًا ما يعطون إجابة قاطعة بالنفي أو الإيجاب؛ نظرًا لأن مثل هذه الإجابة لا تعكس بدقة النطاق الكامل للاحتمالات. يتحدث العلماء، بدلًا من ذلك، بلغة الاحتمالات والبيانات المشروطة. المثير للسخرية أن هذا الاختلاف في اللغة يجعل الناس عادةً يُسِيئون تفسير ادعاءات العلماء أو يستهينون بها. وبالرغم من الدقة التي يسعى العلماء دومًا لتحقيق المزيد منها، فإن غير الخبراء لا يعرفون بالضرورة كيف يقيِّمون ما يصدره هؤلاء العلماء من بيانات؛ وذلك لأن غير العلماء ممَّن يملكون ما يكفي من الأدلة لدعم فرضياتهم، لن يتردَّدوا في التعبير عن هذه الفرضيات بشكلٍ مؤكَّدٍ، لكن افتقار العلماء لليقين المطلق لا يعكس غياب المعرفة لديهم، وإنما هو ببساطة نتيجة الشكوك المتأصلة في أي قياس، وهذا هو الموضوع الذي سنتناوله الآن. يساعد التفكير القائم على الاحتمالات في توضيح معنى البيانات والحقائق، ويسمح باتخاذ قرارات على قدر أكبر من الاطلاع. وسنستعرض في هذا الفصل ما تخبرنا به القياسات، ونتناول الأسباب التي تجعل البيانات القائمة على الاحتمالات أكثر دقةً في التعبير عن الحالة المعرفية — العلمية منها وغير العلمية — في أي وقت محدَّد.

عدم اليقين العلمي

أتمَّتْ جامعة هارفرد مؤخرًا مراجعةً للمناهج التعليمية في محاولةٍ منها لتجريب العناصر الأساسية للتعليم الحر وتحديدها، ومن الفئات التي تناولتها الجامعة وناقشتها كأحد متطلبات العلم «الاستدلالُ التجريبيُّ». أشار المقترح التعليمي إلى أن هدف الجامعة ينبغي أن يكون «تعليم كيفية جمع البيانات التجريبية وتقييمها، وموازنة الأدلة، وفهم تقييمات الاحتمالات، واستخلاص النتائج من البيانات عند توفُّرِها [حتى الآن، لا اعتراض]، وإدراك الوقت الذي لا يمكن تسوية مسألة ما فيه استنادًا إلى الأدلة المتوفرة.»

إن الصيغة المقترحة للمتطلبات التعليمية — الموضَّحَة فيما بعدُ — كانت حسنةَ النية، لكنها انطوت على سوء فهم جوهري للكيفية التي تسير بها القياسات. بوجه عام، يسوي العلم المسائلَ التي يتناولها باتباع درجةٍ ما من الاحتمالية. يمكننا بالطبع

الوصولُ إلى درجة عالية من الثقة فيما يتعلَّق بفكرة أو ملاحظة معينة، واستخدام العلم لإصدار أحكام صائبة، لكن لا يمكن لأحد في الغالب تسوية أي مسألة — علمية كانت أو غير علمية — على نحو قاطع استنادًا إلى الأدلة. فيمكننا جمع ما يكفي من البيانات للوثوق في العلاقات العرضيَّة، بل للتوصل إلى تنبؤات على نحو دقيق للغاية أيضًا، لكننا لا يمكننا فعل ذلك إلا بأسلوب قائم على الاحتمالات فحسب. ومثلما أوضحنا في الفصل الأول، يسمح عدم اليقين — مهما صَغُرَ — باحتمال وجود ظواهر جديدة مثيرة لم تُكتشَف بعدُ، ونادرًا ما يكون هناك شيء مؤكَّد بنسبة ١٠٠ في المائة، وما من نظرية أو فرضية يمكن ضمان تطبيقها في ظروف لم تخضع للاختبار بعدُ.

لا يمكن إثبات أي ظاهرة بدرجة مؤكدة من الدقة إلا في مجال محدَّد يمكن اختبارها في إطاره؛ فدومًا تنطوي القياسات على عنصر ما من الاحتمالية. ويعتمد الكثير من القياسات العلمية على افتراض وجود حقيقة كامنة يمكننا كشف الستار عنها باتباع قياسات على القدر الكافي من الدقة. ونحن نستخدم القياسات للوصول إلى هذه الحقيقة الكامنة على أفضل نحوٍ يمكننا التوصُّل إليه (أو على أفضل نحوٍ يلزمنا لتحقيق أهدافنا). من ثَمَّ يسمح ذلك بإصدار بيانات من قبيل: إن الفاصل المرتكز على مجموعة من القياسات يتضمن قيمة صحيحة باحتمالية تبلغ نسبتها ٩٥٪. في هذه الحالة، يمكننا القول ببساطة إن نسبة ثقتنا تساوي ٩٥ في المائة. مثل هذه الاحتمالات توضِّح لنا مدى موثوقية أي قياس محدَّد، والنطاق الكامل للاحتمالات والمعاني الضمنية، ولا يمكنك الوصول إلى فهم كامل لقياس ما دون معرفة الشكوك المرتبطة به وتقييمها.

ومن مصادر عدم اليقين غياب أدوات قياس على مستوًى لامتناهٍ من الدقة. فالقياس الدقيق بحاجة لجهاز تمت معايرته بعدد لا محدود من المنازل العشرية، والقيمة المقيسة ستتضمن عددًا لا محدودًا من الأرقام المقيسة بعناية بعد المنزلة العشرية. ولا يمكن للفيزيائيين التجريبيين إجراء مثل هذا النوع من القياسات، وإنما يمكنهم فقط معايرة أدواتهم لجعلها على أكبر قدر ممكن من الدقة باستخدام التكنولوجيا المتاحة، مثلما فعل عالم الفلك تيكو براهي على نحو محنك منذ ما يزيد عن أربعة قرون. والتكنولوجيا التي يتزايد تطوُّرها يومًا بعد يوم تؤدِّي إلى ظهور أجهزة قياس أكثر دقةً، لكن القياسات لن تصل أبدًا إلى الدقة المتناهية المرجوة، رغم التطورات العديدة التي ظهرت على مدار الزمن، وسيظل دومًا «عدم اليقين النظامي»[1] سمةً من سمات جهاز القياس نفسه.

وعدم اليقين لا يعني أن يتعامل العلماء مع جميع الخيارات أو البيانات على قدم المساواة (وإن كانت التقارير الإخبارية ترتكب هذا الخطأ دائمًا)؛ فنادرًا ما تكون نسبة

الاحتمال ٥٠ في المائة. لكن عدم اليقين يعني أن العلماء (أو أي أحد آخَر يسعى للوصول إلى الدقة المتناهية) سيصدرون بيانات توضِّح ما تمَّ قياسه وما يعنيه هذا القياس على نحو قائم على الاحتمالات، حتى عندما تكون هذه الاحتمالاتُ عاليةً للغاية.

وعندما يتوخَّى العلماء وخبراء الكلام الحذر الشديد، يستخدمون كلمتَيْ «دقيق» و«مضبوط» بمعانٍ مختلفة. فالجهاز يكون «دقيقًا» إذا كرَّرْتَ قياس كمية واحدة، ولم تختلف القيمة التي تسجِّلها في المرتين اختلافًا كبيرًا؛ فالدقة هي قياس درجة الاختلاف، وإذا لم تختلف نتيجة تكرار القياس كثيرًا، فمعنى ذلك أن القياس دقيق. ونظرًا لأن القيم الأدق تظهر في النطاقات الأصغر حجمًا، فإن القيمة المتوسطة تتشكَّل سريعًا إذا أُجرِيت قياسات متكرِّرة.

على الجانب الآخَر، يوضِّح «الضبط» مدى اقتراب متوسط القياس للنتيجة الصحيحة. بعبارة أخرى، هو يوضِّح ما إذا كان هناك «انحيازٌ» في جهاز القياس أم لا. من الناحية الفنية، لا يُسفِر الخطأُ المتأصِّل في جهاز القياس عن تراجُعٍ في دقته — فسوف تتوصَّل إلى النتيجة الخاطئة عينها في كل مرة — لكنه بالتأكيد يقلِّل من ضبطه. و«عدم اليقين النظامي» يشير إلى نقص الضبط الذي لا يمكن التغلُّب عليه والمتأصِّل في أجهزة القياس نفسها.

لكن في كثير من الأحيان، حتى إن استطعت تصميم جهازِ قياسٍ مثاليٍّ، فستظل بحاجة لإجراء الكثير من القياسات للوصول إلى النتيجة الصحيحة. ويرجع ذلك إلى أن المصدرَ الآخَر لعدم اليقين[2] «إحصائيٌّ»؛ ما يعني أن القياسات تستلزم عادةً تكرارها عدة مرات قبل أن يمكنك الوثوق في النتيجة. حتى الأجهزة الدقيقة لا تقدِّم بالضرورة القيمةَ الصحيحةَ لأي قياس معين، لكن المتوسط سيقترب من الإجابة الصحيحة. ويتحكَّم عدم اليقين النظامي في ضبط القياس، في حين يؤثِّر عدم اليقين الإحصائي على دقته. والدراسات العلمية السليمة تأخذ كلا العاملين في الاعتبار، وتُجرَى القياسات بأكبر قدر ممكن من الحرص على أكبر عيِّنَة يمكن توفُّرها. ومن المنظور المثالي، يرغب المرء دومًا في أن تتميَّز القياسات التي يجريها بالدقة والضبط لكي تكون الأخطاء المتوقَّعة بسيطةً، ولكي يثق في القيم التي سيتوصَّل إليها. يعني ذلك أنه يرغب في أن تقع هذه القياسات داخل أضيق نطاق ممكن (الدقة)، وأن تقترب من الإجابة الصحيحة (الضبط).

من الأمثلة المألوفة (والمهمة) التي يمكننا تناول هذه المفاهيم في إطارها اختباراتُ فعاليَّةِ الأدوية. لا يصرِّح الأطباء عادةً عن الإحصائيات المتعلقة بالعقاقير، أو لعلهم لا

يعرفونها. هل شعرت بالإحباط من قبلُ عندما قال لك الطبيب: «يحقِّق هذا الدواء نتيجة أحيانًا، ولا يحقِّقها أحيانًا أخرى»؟ تحجب هذه العبارة الكثير من المعلومات المفيدة؛ فهي لا تقدِّم أي فكرة عن نسبة نجاح الدواء، أو مدى التشابه بينك وبين الأفراد الذين جُرِّبَ عليهم الدواء، ويجعل ذلك من الصعوبة بمكان تقرير ما يجب فعله. ولعل العبارة الأكثر نفعًا هي التي تخبرنا بنِسَبِ نجاحِ الدواء أو الإجراء مع مرضى من نفس السن أو بنفس مستوى اللياقة البدنية، حتى في الحالات التي لا يفهم فيها الأطباء أنفسهم الإحصائيات، يمكنهم بالتأكيد تقديمُ بعض البيانات أو المعلومات للمريض.

وإحقاقًا للحق، «التباين» الذي يظهر بين الأفراد من حيث اختلاف ردود أفعالهم تجاه الأدوية، يجعل من تحديد نجاح الدواء مسألة معقَّدة؛ لذا لننظر أولًا في حالةٍ أبسط يمكننا اختبارها على فرد واحد، مثل اختبار ما إذا كان الأسبرين يساعد في تخليصك من آلام الصداع أم لا.

تبدو كيفية التوصُّل إلى إجابة عن هذا السؤال يسيرة: ما عليك سوى تناول قرص أسبرين وملاحظة ما إذا كان سيحقِّق نتيجة أم لا. لكن الحقيقة هي أن الأمرَ أكثرُ تعقيدًا بعض الشيء؛ فحتى إنْ شعرت بتحسُّن، كيف لك أن تعرف ما إذا كان الأسبرين هو السبب في هذا التحسن؟ للتأكد مما إذا كان قد نجح أم لا حقًّا — بمعنى ما إذا صار الصداع أقلَّ إيلامًا أو تبدَّدَ الشعور به أسرع دون الأسبرين — يلزم أن تكون قادرًا على مقارَنَةِ ما تشعر به في وجود الأسبرين ودونه. مع ذلك، ونظرًا لأنك إما أخذت الأسبرين أو لم تأخذه، فإن عمليةَ قياسٍ واحدةً ليست كافيةً لمنحك الإجابة التي تبغيها.

للتوصُّل إلى هذه الإجابة، عليك تكرار الاختبار عدة مرات. في كل مرة تشعر فيها بالصداع، ارمِ عملةً معدنيةً في الهواء لتقرِّر ما إذا كنتَ ستأخذ الأسبرين أم لا، وسجِّلِ النتيجة. بعد تكرار هذا الأمر لعدد كافٍ من المرات، يمكنك التوصُّل إلى متوسط، مع الوضع في الاعتبار الأنواع المختلفة للصداع الذي تعاني منه والظروف المتنوعة التي يظهر فيها (فربما يتبدَّد الشعورُ به سريعًا عندما لا تكون ناعسًا للغاية). ويمكنك استخدام الإحصائيات التي توصَّلْتَ إليها للوصول إلى النتيجة السليمة. من المفترض ألَّا ينطوي القياس الذي أجريتَه على أي انحياز من جانبك؛ نظرًا لأنك استندتَ فيه إلى إلقاء عملة معدنية في الهواء، والعينة التي أجريتَ عليها التجربة لم يكن بها غيرك؛ ومن ثَمَّ فإن النتيجة التي توصَّلْتَ إليها ستتأكد على نحو صحيح مع إجراء العدد الكافي من الاختبارات على نفسك.

كم سيكون من الرائع لو تمكنَّا من اختبار فعالية الأدوية باتباع هذا الإجراء البسيط. لكن، في الحقيقة، أغلب الأدوية تُستخدَم لعلاج أمراض أخطر بكثير من الصداع، ومنها ما يُسفِر عن الوفاة، علاوةً على ذلك، الكثير من الأدوية لها آثار طويلة المدى؛ لذلك لا يمكنك تكرار التجارب القصيرة المدى على فرد واحد، حتى إن أردتَ ذلك.

ومن ثَمَّ، عندما يختبر علماء الأحياء والأطباء عادةً مدى فعالية دواء ما، فإنهم لا يجرِّبونه على فرد واحد فحسب، حتى إن فضَّلُوا فِعْل ذلك لأهداف علمية على الأقل. فعليهم التأقلم مع حقيقة أن الاستجابة للدواء تختلف من فرد لآخَر، وأن أي دواء يؤدِّي إلى مجموعة متنوعة من النتائج، حتى عند اختباره على أفراد يعانون من الدرجة نفسها من شدة المرض؛ ومن ثَمَّ فإن أفضل سبيل يمكن للعلماء اتباعه في أغلب الحالات، هو تصميم دراسات تُجرَى على أفراد يتَّسِمون بأكبر قدر ممكن من التشابه مع الشخص الذي يحاول العلماء الوصول إلى قرار بشأن منحه الدواء. لكن على أرض الواقع، لا يصمِّم معظم الأطباء الدراسات بأنفسهم؛ ومن ثَمَّ يكون من الصعب عليهم ضمان التشابه مع المريض الذي يجرون عليه التجربة.

قد يرغب الأطباء، بدلًا من ذلك، في محاولة استخدام دراسات قائمة بالفعل لم تُجْرَ فيها تجارب مصمَّمة بعناية، وإنما استندت في نتائجها إلى ملاحظات لأفراد موجودين بالفعل فقط، مثل أعضاء مؤسسات تنسيق خدمات الرعاية الصحية. يواجه الأطباء، بعد ذلك، معضلة التوصُّل إلى تفسير صائب. في هذا النوع من الدراسات، قد يصعب التأكُّد مما إذا كان القياس المعنِيُّ يُثبِت السببية، وليس فقط الصلة أو الارتباط. على سبيل المثال، قد يستنتج شخص ما — خطأً — أن اصفرارَ الأصابع يتسبَّب في الإصابة بسرطان الرئة، لملاحظته هذا الاصفرار لدى العديد من المرضى بهذا السرطان.

لذلك، يُفضِّل العلماءُ الدراساتِ التي تُخصَّص فيها أنواع العلاج أو عمليات تلقيه على نحو عشوائي. على سبيل المثال، الدراسات التي يحصل فيها الأفراد على دواء ما بناءً على رَمْي عملةٍ معدنية في الهواء تكون أقل اعتمادًا على عيِّنَةِ الأفراد؛ وذلك لأن احتمالية ما إذا كان المريض سيتلقَّى العلاج أم لا، تعتمد فقط على النتيجة العشوائية لرَمْي العملة. وبالمثل، يمكن للدراسة العشوائية — من ناحية المبدأ — توضيحُ العلاقات بين التدخين وسرطان الرئة واصفرار الأصابع. فإذا حدَّدْتَ عشوائيًّا لأفرادِ مجموعةٍ ما إذا كانوا سيدخنون أم لا، فستتوصَّل إلى نتيجة بشأن ما إذا كان التدخين — على الأقل — عاملًا أساسيًّا مسئولًا عن اصفرار الأصابع وسرطان الرئة لدى المرضى الذين يخضعون

لملاحظتك، وما إذا كان أيهما سببًا في حدوث الآخَر، وبالطبع ستكون هذه الدراسة غير أخلاقية.

يهدف العلماء — متى أمكن ذلك — إلى تبسيط نظم عملهم قدر المستطاع من أجل عزل ظواهر معينة يبغون دراستها. ويُعَد اختيار كلٍّ من اختيارِ عينة أفراد واضحة المعالم ومجموعة ضابطة مناسبة عاملًا ضروريًّا لدقة النتيجة وضبطها. ومع المسائل المعقدة، مثل أثر دواءٍ ما على البيولوجيا البشرية، يتدخل الكثير من العوامل على نحو متزامن، ويكون السؤال الملائم حينئذٍ هو: ما مدى الموثوقية التي يجب أن تكون عليها النتائج؟

الهدف من القياسات

لا تكون القياسات مثالية أبدًا. وفي حالة البحث العلمي — شأنه شأن أي قرار آخَر — علينا تحديد مستوًى مقبول من الشك؛ إذ يسمح لنا ذلك بالمضي قدمًا. على سبيل المثال، إذا كنتَ تحصل على دواء تأمل في أن يريحك من آلام الصداع التي تزعجك، يمكن أن تقتنع بتجربته حتى إن كان من المعروف أن نسبة مساعدته في تخفيف الألم ٧٥ في المائة (مع أقل قدر ممكن من الآثار الجانبية). على الجانب الآخَر، إذا كان تغييرٌ ما في النظام الغذائي سيقلِّل من الاحتمال الضعيف لإصابتك بمرض بالقلب بنسبة اثنين في المائة فقط، فلن يزعجك ذلك بما يكفي لإقناعك بالتخلِّي عن تناول فطيرة الكريمة المفضَّلة لديك.

أما في مجال السياسة العامة، قد تكون نقاط اتخاذ القرار أقل وضوحًا، فيقع الرأي العام عادةً في منطقة رمادية لا يتفق فيها الناس بالضرورة على مدى الدقة التي يجب أن نعرف بها شيئًا ما قبلَ تغيير القوانين أو تطبيق القيود. وهناك عوامل عدة من شأنها تعقيد الحسابات الضرورية في هذا الشأن. ومثلما أوضحنا في الفصل السابق، يُسفِر غموضُ الأهداف والأساليب عن صعوبة إجراء تحليلات التكاليف والفوائد على نحو موثوق، هذا إن لم يؤدِّ إلى استحالته برمته.

وقد كتب نيكولاس كريستوف، الصحفي بجريدة «نيويورك تايمز» عن ضرورة الاحتراس من الكيماويات المحتملة الخطورة في الأغذية والحاويات قائلًا: «إن الدراسات التي أُجرِيت على الكيماويات المحتملة الخطورة قد دقَّتْ ناقوس الخطر لعقود، ولا تزال

الأدلة على ذلك معقَّدَة وقابلة للمناقشة. هذه هي الحياة: في العالم الواقعي، لا بد من اتخاذ القرارات التنظيمية عادةً استنادًا إلى بيانات ملتبسة ومتباينة.»[3]

والقضايا الموضحة فيما سبق لا تنفي ضرورة استهدافنا الوصول إلى تقديرات كمية للتكاليف والفوائد عند تقييم أي سياسة، لكنها تعني في الوقت نفسه أنه علينا أن ندرك بوضوح ما تعنيه هذه التقديرات، ومدى تنوُّعها وفقًا للافتراضات أو الأهداف، وما الجوانب التي وضعتها الحسابات في الاعتبار، وتلك التي لم تضعها. يمكن لتحليلات التكاليف والفوائد أن تكون مفيدةً، لكنها قد تمنحك أيضًا شعورًا زائفًا بالصمود واليقين والأمان، ما يُسفِر بدوره عن تطبيقات مضلِّلة في المجتمع.

ولحسن حظ الفيزيائيين، الأسئلة التي يطرحونها تكون غالبًا أبسط بكثير — على الأقل في صياغتها — من الأسئلة التي تُطرَح في السياسة العامة. فعندما نتعامل مع المعرفة الخالصة دون الاهتمام المباشِر بالتطبيقات، نطرح أنواعًا مختلفة من الاستفسارات. وقياسات الجسيمات الأولية أبسط بكثير، على الأقل من الناحية النظرية؛ إذ تتشابه جميع الإلكترونات في جوهرها؛ ومن ثَمَّ يكون ما ينبغي القلق بشأنه هو الأخطاء الإحصائية والنظامية، وليس التباين بين العناصر التي تخضع للتجربة. فسلوك إلكترون واحد يعبِّر عن سلوك جميع الإلكترونات الأخرى. لكن يظل من الممكن ظهور أخطاء إحصائية ونظامية، ويحاول العلماء الحدَّ منها قدر المستطاع، لكن المدى الذي سيصل إليه هؤلاء العلماء في تحقيق ذلك يتوقَّف على الأسئلة التي يحاولون الإجابة عنها.

مع ذلك، حتى في النظم الفيزيائية «البسيطة» — مع الوضع في الاعتبار أن القياسات لا يمكن أن تكون مثالية أبدًا — ينبغي تحديد الدقة المُستهدَفة. على المستوى العملي، يتساوى هذا السؤال مع التساؤل عن عدد مرات تكرار القياس التي ينبغي لعالم التجارب اتباعها، ومدى الدقة التي ينبغي أن تتسم بها أداة القياس التي يستخدمها. والإجابة هي: الأمر يعود إليه. فالمستوى المقبول للشك يعتمد على السؤال الذي يطرحه العالِم، والأهداف المختلفة تتطلب درجاتٍ مختلفةً من الدقة والضبط.

على سبيل المثال، تقيس الساعات الذرية الوقتَ بثبات يصل إلى واحد كل ١٠ تريليونات، لكن القليل فقط من القياسات يتطلَّب مثل هذه المعرفة الدقيقة للوقت. يُستثنَى من ذلك اختباراتُ نظريةِ الجاذبية لأينشتاين؛ إذ تستخدم أكبر قدر يمكن تحقيقه من الدقة والضبط. ورغم أن جميع الاختبارات تُثبِت أن هذه النظرية صحيحة، تواصِل القياسات تطوُّرَها. ومع تزايد الدقة، يمكن أن تظهر انحرافات لم يسبق

اكتشافها من قبلُ، وتعكس آثارًا فيزيائية جديدة كان من المستحيل رؤيتها في ظل القياسات السابقة الأقل دقةً؛ عندئذٍ ستمنحنا هذه الانحرافات معلوماتٍ دقيقةً مهمةً عن الظواهر الفيزيائية الجديدة، وفي حال عدم ظهورها، سنثق في أن نظرية أينشتاين باتَتْ أدقَّ مما سبق إثباته من قبلُ، وسنعرف أنه بإمكاننا تطبيقها بثقة على نظام أكبر للطاقة والمسافات، وبدرجة أعلى من الدقة. على الجانب الآخَر، إذا كنتَ تفكِّر في إرسال رجل إلى الفضاء، فستحتاج إلى فهم القوانين الفيزيائية فهمًا وافيًا لتتمكن من توجيه الصاروخ توجيهًا صحيحًا، لكنك لن تحتاج إلى فهم النسبية العامة، وبالتأكيد لن تحتاج للأخذ في الاعتبار الآثارَ الأقل احتمالًا للانحرافات المحتملة.

الضبط في فيزياء الجسيمات

نعمد في فيزياء الجسيمات إلى البحث عن القواعد الأساسية التي تحكم مكونات المادة الأصغر حجمًا والأكثر جوهريةً التي يمكننا اكتشافها. والتجربة الواحدة لا تقيس مزيجًا من التصادمات المتعدِّدة التي تحدث في آنٍ واحدٍ أو تتفاعل بشكل متكرِّر على مدار الوقت؛ فالتنبؤات التي نُجرِيها تسري على التصادمات الفردية لجسيمات معروفة تتصادم في ظل قدر محدَّد من الطاقة. وتدخل الجسيمات نقطة التصادم وتتفاعل وتتحرك عبر الكواشف، وعادةً ما تخلف طاقةً في هذه الأثناء. ويصف الفيزيائيون تصادمات الجسيمات بالخصائص المميزة للجسيمات الصادرة عنها (مثل: كتلتها، وطاقتها، وشحناتها).

من هذا المنطلق، ورغم التحديات الفنية التي تواجِهها التجاربُ، فإن فيزيائيي الجسيمات محظوظون؛ فنحن ندرس أنظمةً أساسية إلى أبعد حدٍّ ممكن حتى نتمكَّنَ من عزل القوانين والمكونات الأساسية لها، ويكمن الهدف هنا في إقامة أنظمة تجريبية على أكبر قدر من الوضوح الذي تسمح به الموارد المتوفرة. والتحدي الذي يواجهه الفيزيائيون هو الوصول إلى المعايير الفيزيائية اللازمة، وليس النظم المعقدة المتداخلة؛ لذا تتَّسِم التجارب بصعوبتها؛ لأن العلم عليه دفع حدود المعرفة لتصير مثيرة للاهتمام، ومن ثَمَّ تقع التجارب عادةً عند أبعد نقطة لتخوم الطاقات أو المسافات التي يمكن للتكنولوجيا الوصول إليها.

إلا أن تجارب فيزياء الجسيمات ليست بهذا القدر من البساطة، حتى عند دراستها الكميات الأساسية المحدَّدة. فعندما يعرض الفيزيائيون التجريبيون النتائجَ التي توصَّلوا

إليها، يواجهون أحدَ تحدِّيَيْن. فإذا توصَّلوا إلى شيء غريب، يجب أن يكونوا قادرين على إثبات أنه لا يمكن أن يكون نتيجةَ أحداثٍ عاديةٍ للنموذج القياسي تتشابه أحيانًا مع الآثار والجسيمات الجديدة. على الجانب الآخَر، إذا لم يتوصَّلوا إلى شيء جديد، فسيكون عليهم التيقُّن من درجة الضبط من أجل وضع حدٍّ جديد أكثر صرامةً لما يمكن أن يوجد بعيدًا عن آثار النموذج القياسي المعروفة، وعليهم أن يتفهَّموا حساسيةَ جهازِ القياس بالقدر الكافي لمعرفة ما عليهم استبعاده.

وللتيقُّن من النتيجة التي توصَّلوا إليها، يجب أن يتمتع الفيزيائيون التجريبيون بالقدرة على التمييز بين هذه الأحداث التي يمكن أن تشير إلى عمليات فيزيائية جديدة، والأحداث «الخلفية» التي تنتج عن جسيمات النموذج القياسي المعروفة. ويُعَدُّ ذلك أحد الأسباب التي تجعلنا بحاجة للعديد من التصادمات للوصول إلى اكتشافات جديدة؛ فوجود الكثير من التصادمات يضمن وقوع ما يكفي من الأحداث التي تنتمي إلى عالم الفيزياء الجديدة لتمييزها عن عمليات النموذج القياسي «الاعتيادية» التي قد تتشابه معها.

لذا، تتطلب التجارب إحصائيات مناسبة، والقياسات نفسها تنطوي على بعض مواطن عدم اليقين المتأصِّلة فيها، الأمر الذي يُحتِّم تكرارها. وتنصُّ ميكانيكا الكم على أن الأحداث الأساسية تنطوي على مواطن عدم اليقين هذه أيضًا، فتشير ميكانيكا الكم ضمنًا إلى أنه بغض النظر عن مدى براعتنا في تصميم التكنولوجيا التي نستخدمها، لا يمكننا سوى حساب احتمالية وقوع التفاعلات. فعدم اليقين قائم، بغض النظر عن كيفية إجرائنا لعملية القياس، ويعني ذلك أن السبيل الوحيد لقياس قوة تفاعُلٍ ما بدقةٍ هو تكرار القياس عدة مرات. وفي بعض الأحيان، يكون مقدار عدم اليقين هذا أقل من عدم يقين القياس، وأقل بكثير من أن يكون له أي أهمية، لكن علينا أخذه في الاعتبار أحيانًا.

يشير لنا عدم اليقين المتعلِّق بميكانيكا الكم، على سبيل المثال، إلى أن كتلة الجسيم المتحلِّل هي كمية غير مؤكدة جوهريًّا. وينص المبدأ العام على أنه ما من قياس للطاقة يمكن أن يتسم بالدقة عندما يستغرق وقتًا محدودًا؛ ومن ثم يكون وقت القياس في هذه الحالة أقصر بالتأكيد من عمر الجسيم المتحلل. لذا، إذا كان هدف الفيزيائيين التجريبيين هو الوصول إلى أدلةٍ على وجود جسيم جديد عن طريق التوصُّل إلى الجسيمات التي تحوَّل إليها مع التحلُّل، فسيتطلَّب قياسُ كتلتها تكرارَ التجربة مرات عديدة. ورغم أنه

ما من قياس واحد يمكن أن يكون دقيقًا، فسيكون متوسط جميع القياسات هو القيمة الصحيحة.

وفي أحيان كثيرة، يكون عدم اليقين الكمي المتعلِّق بالكتلة أقل من عدم اليقين النظامي (الخطأ المتأصِّل) بأجهزة القياس. وعندما يكون هذا صحيحًا، يمكن للتجارب تجاهُل عدم اليقين الكمي المتعلق بالكتلة، لكن تظل هناك حاجة للكثير من القياسات لضمان دقة القياس، وذلك بسبب الطبيعة الاحتمالية للتفاعلات المعنِيَّة بالدراسة. وكما هو الحال في اختبارات فعالية الأدوية، تساعدنا الإحصائيات الكبيرة في التوصُّل إلى الإجابة الصحيحة.

علينا الإقرار بأن الاحتمالات المرتبطة بميكانيكا الكم ليست عشوائية على نحو تامٍّ؛ فيمكن حساب الاحتمالات بناءً على قوانين واضحة. وسوف نستعرض ذلك في الفصل الرابع عشر الذي يتناول موضوع كتلة بوزون W. فنحن نعلم الشكل الكلي للمنحنى الذي يصف احتمالية ظهور هذا الجسيم ذي الكتلة المحدَّدة والعمر المحدَّد نتيجةَ تصادُمٍ ما. وتتمحور كل عملية قياس للطاقة حول القيمة الصحيحة، ويتسق التوزيع مع عمر الجسيم ومبدأ عدم اليقين. ورغم أن قياسًا واحدًا لا يكفي لتحديد الكتلة، فإن العديد من القياسات يمكنه فعل ذلك، ويمكن لإجراء محدَّد أن يوضِّح لنا كيفية استنتاج الكتلة من القيمة المتوسطة لهذه القياسات المتكررة. والعديد من القياسات يضمن على نحو وافٍ أن يحدِّد الفيزيائيون التجريبيون الكتلةَ السليمة في إطار مستوًى معين من الدقة والضبط.

القياسات ومصادم الهادرونات الكبير

إن كلًّا من استخدام الاحتمالية في عرض النتائج العلمية، والاحتمالات المتأصلة في ميكانيكا الكم، لا يعنيان جهل العلماء، بل إنهما في الواقع يثبتان العكس؛ فنحن نعلم الكثير. على سبيل المثال، «العزم المغناطيسي للإلكترون» هو سمة متأصلة في الإلكترون يمكننا حسابها بدقة متناهية باتباع «نظرية المجال الكمي» التي تجمع بين ميكانيكا الكم والنسبية الخاصة، وهو أيضًا أداة تُستخدَم لدراسة الخصائص الفيزيائية للجسيمات الأولية. أجرى زميلي بجامعة هارفرد، جيرالد جبريالسي، قياسًا للعزم المغناطيسي للإلكترون بدرجة دقة وضبط تبلغ ١٣ رقمًا، ووجد أنه يتفق مع التنبؤ الذي أُجرِي عند هذا المستوى تقريبًا. فعدم اليقين لا يظهر إلا في مستوًى أقل من واحد في التريليون، وهذا

يجعل العزم المغناطيسي للإلكترون ثابتًا فيزيائيًّا مع أدق درجات الاتفاق بين القياس والتنبؤ النظري.

لا يمكن لأحد خارج مجال الفيزياء إجراء مثل هذا التنبؤ الدقيق بشأن العالم، لكن معظم مَن يتوفَّر لديهم مثل هذا الرقم الدقيق، سيقولون إن بإمكانهم بالتأكيد معرفة النظرية والظواهر التي يتنبَّأ بها. لكن العلماء — رغم قدرتهم على إصدار بيانات على قدر من الدقة يفوق أي شخص آخَر — يُقِرُّون بأن القياسات والملاحظات، بغضِّ النظر عن مدى دقتها، تظل تفسح مجالًا لأفكار وظواهر جديدة لم يُكشَف الستار عنها بعدُ.

لكن بإمكان العلماء، في الوقت نفسه، تعيين حدٍّ محدَّدٍ لحجم هذه الظواهر الجديدة، ويمكن للفرضيات الجديدة أن تغيِّر التنبؤات، لكن فقط عند مستوى عدم اليقين القياسي القائم أو أقل. وأحيانًا، تكون الآثار الجديدة التي يتم التنبؤ بها ضئيلةً لدرجة لا تسمح لنا على الإطلاق برؤيتها على مدار عمر هذا الكون. وفي هذه الحالة، حتى العلماء يمكنهم إصدار تصريح محدَّد مثل: «لن يحدث ذلك مطلقًا.»

من الجلي أن قياس جبريالسي يوضِّح أن نظرية المجال الكمي صحيحة لدرجة عالية للغاية من الدقة. ومع ذلك، لا يمكننا التصريح بثقة بأن الأمر يقتصر على نظرية المجال الكمي، أو فيزياء الجسيمات، أو النموذج القياسي فحسب. فمثلما أوضحنا في الفصل الأول، فإن الظواهر الجديدة، التي لا تظهر آثارها إلا عند نطاقات طاقة مختلفة أو عندما نجري قياسات أكثر دقة، يمكن أن تقع خارج إطار ما نراه. ونظرًا لأننا لم ندرس نظم المسافات والطاقات تجريبيًّا، فإننا لا نعلمها حتى الآن.

تُجرَى تجارب مصادم الهادرونات الكبير عند مستويات طاقة أعلى بكثير مما درسناه من قبلُ؛ ومن ثَمَّ فهي تفتح المجال أمام احتمالات جديدة في صورة جسيمات أو تفاعلات جديدة تبحث عنها التجارب مباشرةً، وليس عن طريق الآثار غير المباشرة التي لا يمكن تحديدها إلا باستخدام قياسات دقيقة للغاية. وفي جميع الأحوال، لن تصل قياسات مصادم الهادرونات الكبير إلى مستوًى من الطاقة يسمح لنا برؤية الانحرافات عن نظرية المجال الكمي، لكنها ربما ستكشف عن ظواهر أخرى من شأنها التنبؤ بانحرافات عن تنبؤات النموذج القياسي فيما يتعلق بالقياسات عند مستوى الدقة الحالي، ويشمل ذلك العزم المغناطيسي للإلكترون المقيس جيدًا.

في أي نموذج فيزيائي يتجاوز حدود النموذج القياسي، تكون أي اختلافات طفيفة تم التنبؤ بها — حيث تؤدي التفاعلات الداخلية بأي نظرية لم يُكشَف عنها الستارُ

بعدُ إلى اختلاف واضح — دليلًا مهمًّا على الطبيعة الجوهرية للواقع. وغياب مثل هذه الاختلافات الطفيفة حتى الآن يوضِّح لنا مستوى الدقة أو مدى ارتفاع الطاقة التي نحتاج إليها للوصول إلى شيء ما جديد، حتى دون معرفة طبيعة الظواهر الجديدة المحتمل اكتشافها على وجه الدقة.

والدرس الحقيقي للنظريات الفعَّالة — التي تحدَّثْنا عنها في مقدمة هذا الكتاب — هو أننا لا نستوعب ما ندرسه وما ينطوي عليه من قيود استيعابًا كاملًا إلا عندما نشهد فشله. فالنظريات الفعَّالة، التي تضم قيودًا موجودة بالفعل، لا تصنِّف أفكارنا في نطاق معين فحسب، وإنما تقدِّم لنا أيضًا أساليب منهجية لتحديد إلى أي مدى يمكن أن يصل حجم الآثار الجديدة في مستوًى معين من الطاقة.

وتتفق القياسات المتعلقة بالقوتين الضعيفة والكهرومغناطيسية مع تنبؤات النموذج القياسي حتى مستوى دقة قدره ٠٫١ في المائة. وتتفق معدلات تصادم الجسيمات، وكتلها، ومعدلات تحللها، وغير ذلك من الخصائص الأخرى مع القيم المتنبَّأ بها عند هذا المستوى من الدقة والضبط؛ ومن ثَمَّ فإن النموذج القياسي يفسح المجال لاكتشافات جديدة. والنظريات الفيزيائية الجديدة يمكنها أن تؤدِّي إلى انحرافات، لكنها لا بد أن تكون طفيفة للغاية لكي تَحُول دون اكتشافها حتى الآن. وآثار أي ظواهر جديدة أو نظريات أساسية يجب أن تكون بسيطة لدرجة تحول دون مشاهدتها حتى الآن؛ إما لأن التفاعلات ذاتها بسيطة، أو لأن الآثار ترتبط بجسيمات ثقيلة إلى درجة تمنع إنتاجها عند الطاقات التي تَمَّ التوصُّل إليها بالفعل. والقياسات القائمة بالفعل توضِّح لنا مدى ارتفاع الطاقة اللازم للعثور على جسيمات أو قوًى جديدة مباشِرة، والتي لا يمكن أن تُحدِث بالقياسات انحرافات أكبر مما تسمح به الشكوك الحالية، كما توضِّح لنا هذه القياسات مدى ندرة هذه الأحداث. وبزيادة مستوى دقة القياس بالقدر الكافي، أو إجراء تجربة في ظل ظروف فيزيائية مختلفة، يبحث الفيزيائيون التجريبيون عن انحرافات عن النموذج الذي وصف حتى الآن جميعَ نتائج تجارب فيزياء الجسيمات.

تعتمد التجارب الحالية على إدراكنا أن الأفكار الجديدة تقوم على نظرية فعَّالة ناجحة تنطبق عند مستويات الطاقة المنخفضة، وتهدف هذه التجارب لكشف الستار عن مادة جديدة أو تفاعلات جديدة، مع الوضع في الاعتبار أن الفيزياء تبني المعرفةَ بكلِّ نطاق على حدة. وبدراسة الظواهر عند طاقات مصادم الهادرونات الكبير العالية، نطمح في التوصُّل إلى النظرية التي يقوم على أساسها كلُّ ما رأيناه حتى الآن، واستيعاب

هذه النظرية استيعابًا كاملًا. وحتى قبل أن نقيس الظواهر الجديدة، ستقدِّم لنا بيانات مصادم الهادرونات الكبير قيودًا صارمة، وقيمةً للظواهر والنظريات التي يمكن أن توجد وتتجاوز حدود النموذج القياسي. وفي حال كانت الاعتبارات النظرية صحيحة، لا بد أن تظهر ظواهر جديدة في النهاية عند الطاقات العالية التي يدرسها مصادم الهادرونات الكبير. مثل هذه الاكتشافات ستجبرنا على توسيع نطاق النموذج القياسي أو استيعابه في صياغة أكثر شمولًا، وسينطبق هذا النموذج الأكثر شمولًا بقدر أكبر من الدقة على مجموعة أكبر من النطاقات.

نحن لا ندري أي النظريات ستتحقَّق على أرض الواقع، ولا ندري كذلك متى سنتوصل إلى اكتشافات جديدة، وتعتمد الإجابة عن هذين السؤالين على ما نحن بصدد الوصول إليه، وهذا لا علم لنا به إلى الآن، وإلا فما كنَّا لنبحث عنه، لكن فيما يتعلق بأي تكهُّن محدَّد بشأن ما يوجد بالفعل، فنحن نعلم كيف نقدِّر الطريقة التي قد نكتشف بها النتائج التجريبية الخاصة به، وكيف نقدِّر الوقت الذي يمكن أن يحدث فيه. في الفصلين التاليين، سوف نتناول كيفية عمل التجارب في مصادم الهادرونات الكبير، وفي الجزء الرابع الذي يليهما، سوف نستعرض كيف يضع الفيزيائيون النماذج والتنبؤات لما يمكن أن يتوصَّلوا إليه.

الفصل الثالث عشر

تجربتا اللولب المركب للميوونات وكاشف أطلس

في أغسطس ٢٠٠٧، شجَّعني الفيزيائي الإسباني ورئيس فريق النظريات في سيرن، لويس ألباريث جومي، بحماس شديد على الانضمام إلى إحدى الجولات بتجربة كاشف أطلس، التي كان عالِمَا الفيزياء التجريبية بيتر جيني وفابيولا جيانوتي يُعِدَّان لها من أجل الزيارة التي سيقوم بها تسونج داو لي الحاصل على جائزة نوبل وبعض الشخصيات الأخرى للمصادم. وكان من المستحيل مقاومة الحماس المذهل لبيتر وفابيلولا، اللذين كانا يشغلَان آنذاك منصبَيِ المتحدث الرسمي ونائب المتحدث الرسمي للتجربة، وكانت خبرتهما وإلمامهما بكافة تفاصيل التجربة يطغيان دومًا على حديثهما.

ارتديت أنا ورفاقي من الزوَّار الآخرين الخوذات على رءوسنا، ودخلنا نفق مصادم الهادرونات الكبير. أول نقطة توقَّفنا عندها كانت منصةً تُمكِّنُنَا من التحديق أثناء الوقوف عليها في الحفرة الواسعة الموجودة بأسفل، كما هو موضَّح في الصورة بالشكل ١٣-١. تسمَّرَتْ قدماي عند مشاهدتي ذلك التجويف العملاق بما احتواه من أنابيب عمودية ستنقل قطع الكاشف من المكان الذي وقفنا فيه إلى القاع الذي يبعد ١٠٠ متر، وترقَّبْتُ أنا ورفاقي السائحون الآخَرون في توقٍ شديدٍ التجربةَ التي كنَّا على وشك رؤيتها.

بعد التوقف الأول، واصلنا المسير إلى الطابق الأول بأسفل الذي ضمَّ بين جنباته كاشفَ أطلس غير المكتمل آنذاك. الجيد في عدم اكتمال الكاشف آنذاك هو أننا تمكَّنَّا من رؤية الأجزاء الداخلية له التي كان سيتم تغطيتها فيما بعدُ وحجبها عن الرؤية، على الأقل حتى يتم إيقافُ تشغيل المصادم لفترة طويلة من الوقت لإجراء أعمال الصيانة



شكل ١٣-١: مشهد لما يمكن رؤيته عند النظر لأسفل من على المنصة الموجودة أعلى حفرة تجربة كاشف أطلس. وتظهر بالشكل الأنابيب التي نقلت المواد إلى أسفل الحفرة.

والإصلاح. ومن ثم، فقد سنحت لنا فرصة إمعان النظر مباشَرةً في الهيكل المفصَّل الذي خلب ألبابنا بألوانه وحجمه الضخم الذي تجاوَزَ حجم صحن كاتدرائية نوتردام.

لكن الحجم نفسه لم يكن أكثر الأمور إذهالًا؛ فمَن عاش منَّا في نيويورك أو أي مدينة أخرى كبيرة لن يفغر فاه بالضرورة أمام المشروعات الإنشائية الضخمة، بل ما يجعل تجربة كاشف أطلس مهيبةً حقًّا هو أن هذا الكاشف الضخم مكوَّن من العديد من عناصر الكشف الصغيرة، وبعضها مُصمَّم خصوصًا لقياس المسافات بدقة على مستوى الميكرونات. مكمن المفارَقَة في كواشف مصادم الهادرونات الكبير أننا بحاجة إلى مثل هذه التجارب الضخمة لقياس أصغر المسافات بدقة. عندما أعرض صور ذلك الكاشف الآن في المحاضرات العامة التي ألقيها، أشعر بضرورة التأكيد على أن تجربة كاشف أطلس ليست فقط كبيرة، لكنها أيضًا دقيقة، وهذا ما يجعلها مذهلة حقًّا.

بعد عام واحد من تلك الزيارة؛ أي في عام ٢٠٠٨، زرتُ سيرن مجدَّدًا، ورأيت التقدُّم الذي أُحرِز في إنشاء تجربة كاشف أطلس؛ فقد أُغلِق جانِبَا الكاشف اللذان كانا مكشوفين في العام السابق. وقمت بجولة مميزة أيضًا في تجربة اللولب المركب للميوونات، وهو

الكاشف الثاني ذو الغرض العام بمصادم الهادرونات الكبير. رافقني في تلك الجولة عالمة الفيزياء سينثيا دا فيا، ومعاوني جيلاد بيريز الذي يظهر في الشكل ١٣-٢.



شكل ١٣-٢: زميلي جيلاد بيريز أمام أحد أجزاء كاشف الميوونات المتعدد الطبقات بتجربة «اللولب المركب للميوونات». وهذا الجزء هو مِقرَن المغناطيس الارتدادي.

لم يكن جيلاد قد سبقت له زيارة تجربة مصادم الهادرونات الكبير من قبلُ، لذلك انتهزتُ الفرصة لأحيا معه من جديد تجربتي الأولى من خلال حماسه. استغللنا نقص الرقابة وتجوَّلْنا في أرجاء المكان، بل ألقينا نظرة أيضًا داخل أحد أنابيب الحزم (انظر الشكل ١٣-٣). أشار جيلاد إلى أن ذلك قد يكون المكان الذي سيشهد إنتاج الجسيمات ذات الأبعاد الإضافية التي ستقدِّم بدورها الدليلَ على نظريةٍ سبَقَ لي طرحها. لكن سواء

مثَّل ذلك دليلًا لهذا النموذج أو غيره، كان من الرائع تذكيري بأن هذا الأنبوب سيشهد ظهور معلومات دقيقة عن عناصر جديدة حقيقية قريبًا.



شكل ١٣-٣: سينثيا دا فيا (يسارًا) تسير عبر الموقع الذي تمكَّنَّا من التحديق منه إلى أسفل، لمشاهدة أنبوب الحزم، ورؤية ما بداخله (يمينًا).

عرَضَ الفصل الثامن من هذا الكتاب مقدمة عن ماكينة مصادم الهادرونات الكبير التي تعمل على تعجيل البروتونات وتصادمها، وفي هذا الفصل سينصب التركيز على كاشفين لهما أهداف عامة بمصادم الهادرونات الكبير؛ أَلَا وهما اللولب المركب للميوونات وكاشف أطلس. من المنتظر من هذين الكاشفين التعرُّف على ما ستُسفِر عنه التصادمات، أما التجارب الأخرى بالمصادم (تجربة تصادم الأيونات الكبيرة، وتجربة الجمال في مصادم الهادرونات الكبير، وتجربة قياس القطاع العرضي الكلي، والتبدُّد المرن، والعمليات الانحرافية، وتجربة ألفا، وتجربة الجسيمات الأمامية بمصادم الهادرونات الكبير) فقد صُمِّمتْ لأهداف أكثر تخصُّصًا، مثل التوصل لفهم أفضل للقوة النووية القوية، وإجراء قياسات دقيقة للكواركات القاعية. هذه التجارب الأخرى ستدرس، على الأرجح، عناصر النموذج القياسي بالتفصيل، لكنها لن تكتشف في الغالب الطاقة العالية

الجديدة التي تتجاوز حدود فيزياء النموذج القياسي، الأمر الذي يُعَدُّ الهدف الأساسي لمصادم الهادرونات الكبير. لكن اللولب المركب للميوونات وكاشف أطلس هما الكاشفان الرئيسيان اللذان سيُجرِيان القياسات التي ستكشف — كما نطمح — عن مادة جديدة وظواهر جديدة.

يشتمل هذا الفصل على قدر كبير من التفاصيل الفنية، المُنظِّرون أنفسهم أمثالي لا حاجة لهم في معرفة هذه الحقائق، والقرَّاء الذين لا يهتمون إلا بالعمليات الجديدة التي قد نكتشفها أو مفاهيم مصادم الهادرونات الكبير بوجه عام يمكنهم تخطِّي هذا الجزء من الكتاب. إلا أن تجارب مصادم الهادرونات الكبير ألمعية ومبهرة، وإغفال هذه التفاصيل سيبخس هذا المشروع حقَّه.

مبادئ عامة

يُعَدُّ كلٌّ من كاشف أطلس واللولب المركب للميوونات التطورَ المنطقي للتحوُّل الذي أحدثه جاليليو وآخرون في العلم منذ عدة قرون؛ فمنذ اختراع المجهر، سمحت التكنولوجيا — التي شهدت تطورًا متتابعًا — للفيزيائيين بالدراسة غير المباشِرة لمسافات أبعد وأبعد، وعلى نحو متكرر كشفت دراسة الأحجام الصغيرة عن البنية الجوهرية للمادة، تلك البنية التي لا يمكن ملاحظتها إلا باستخدام المجسات المتناهية الصغر.

والتجارب التي يضمها مصادم الهادرونات الكبير مُعَدَّة خصوصًا لدراسة البنية الثانوية والتفاعلات بحجم أصغر من السنتيمتر الواحد بمائة ألف تريليون مرة؛ أي أصغر عشرة أضعاف من أي شيء سبقت دراسته باستخدام أي تجربة من قبلُ. وبالرغم من أن التجارب السابقة للمصادمات العالية الطاقة — مثل تجارب المصادم تيفاترون في فيرميلاب في باتافيا بولاية إلينوي — قد قامت على مبادئ مشابِهة لتلك التي تقوم عليها كواشف مصادم الهادرونات الكبير، فإن معدل التصادم والطاقة غير المسبوق الذي تواجِهه هذه الكواشف الجديدة قد فرض العديد من التحديات الجديدة التي فرضت بدورها الحجم والتعقيد غير المسبوقين لها.

وشأنها شأن تليسكوبات الفضاء، بمجرد أن تُشيَّد الكواشف، يستحيل الدخول إليها؛ فهي تُغلَق على عمق كبير تحت سطح الأرض، وتتعرَّض لكميات هائلة من الإشعاع، ولا يمكن لأحد الدخول إلى الكاشف أثناء تشغيله. وحتى في حالة عدم تشغيله، يكون الوصول إلى أي عنصر به صعبًا للغاية ويستغرق وقتًا طويلًا؛ لهذا السبب شُيِّدت

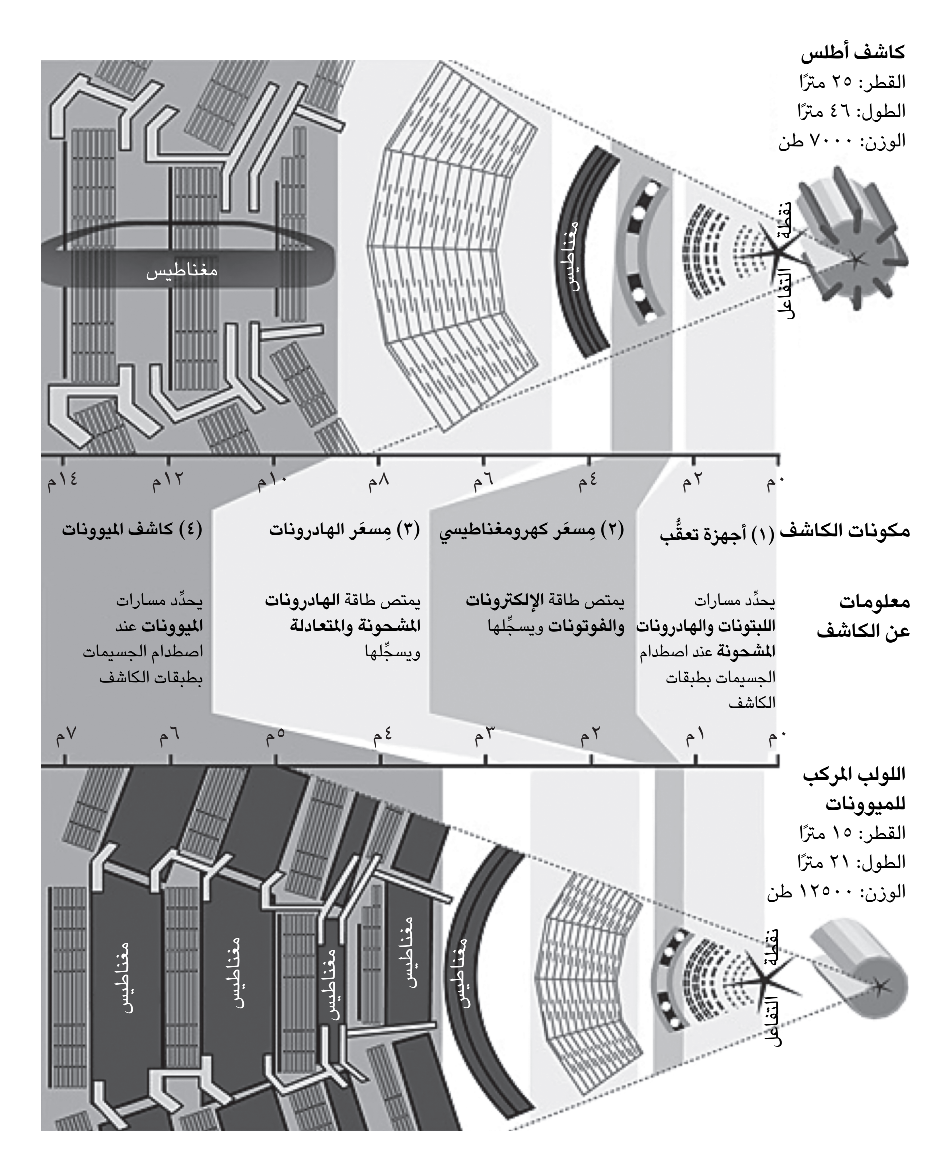
الكواشف لتظلَّ على حالها عقدًا من الزمان على الأقل، حتى دون صيانة. لكن، وُضِعت خطط لفترات إغلاق طويلة بعد كل عامين من تشغيل مصادم الهادرونات الكبير، وفي أثناء هذه الفترة يدخل الفيزيائيون والمهندسون إلى أجزاء عديدة من مكونات الكاشف.

لكن تجارب الجسيمات تختلف اختلافًا كبيرًا عن التليسكوبات في جانب واحد مهم؛ فكواشف الجسيمات لا تستهدف اتجاهًا معينًا، وإنما تستهدف جميع الاتجاهات في آنٍ واحد. تحدث التصادمات، فتظهر الجسيمات، وتسجل الكواشف أي حدث من المحتمل أن يكون ذا أهمية. وجدير بالذكر أن أطلس واللولب المركب للميوونات كاشفان ذوا أهداف عامة؛ فهما لا يسجِّلان نوعًا واحدًا من الجسيمات أو الأحداث فقط، أو يركِّزان على عمليات محدَّدة، وإنما صُمِّم هذان الجهازان التجريبيان لاستيعاب البيانات من أوسع نطاق ممكن من التفاعلات والطاقات. ويحاول الفيزيائيون التجريبيون، عن طريق استغلال القدرة الحاسوبية الهائلة المتوفرة لديهم، استخلاص المعلومات بوضوح بشأن هذه الجسيمات وما يُسفِر عنه تحلُّلها، مستندين في ذلك إلى «الصور» التي تسجِّلها التجارب.

أكثر من ٣٠٠٠ شخص ينتمون إلى ١٨٣ مؤسسة علمية ويمثلون ٣٨ دولة، يشاركون في تجربة اللولب المركب للميوونات؛ حيث يعملون على تشييد الكاشف وتشغيله وتحليل البيانات. ويرأس هذا التعاون الآن الفيزيائي الإيطالي جويدو تونيلي الذي بدأ عمله كنائب المتحدث الرسمي للمشروع.

وفي كسر لقاعدة استئثار الفيزيائيين الذكور بالمناصب الرئاسية في سيرن، انتقلت الإيطالية فابيولا جيانوتي ذات الشخصية المثيرة للإعجاب من منصب نائب المتحدث الرسمي إلى المتحدث الرسمي للمشروع، لكنْ هذه المرة للتجربة الأخرى ذات الأهداف العامة، كاشف أطلس. وقد نالت جيانوتي هذا المنصب عن استحقاق؛ إذ بالرغم مما تتسم به من شخصية حليمة وودودة وسلوك مهذَّب، فإن مساهماتها المؤسسية والفيزيائية هائلة. ما يثير غيرتي حقًّا هو أنها فضلًا عن كل ذلك طاهية ماهرة، وإنْ كان هذا متوقعًا كونها سيدة إيطالية تهتم كثيرًا بالتفاصيل.

تنطوي تجربة كاشف أطلس كذلك على تعاون ضخم؛ فأكثر من ٣٠٠٠ عالم ينتمون إلى ١٧٤ مؤسسة في ٣٨ دولة شاركوا في هذه التجربة (ديسمبر ٢٠٠٩). بدأ التعاون لتنفيذ هذا المشروع في عام ١٩٩٢ عندما اندمجت تجربتان مقترحتان — وهما «تجربة القياسات الدقيقة للطاقة واللبتونات وأشعة جاما» و«الجهاز المزود بحلقات



شكل ١٣-٤: مقاطع عرضيَّة لكاشفَيْ أطلس واللولب المركب للميوونات. يُرجَى ملاحظة أن الأحجام الكلية بالرسم لا تعبِّر عن الأحجام الحقيقية.

فائقة التوصيل» — في تصميم واحد يضم سمات كلتيهما، بالإضافة إلى خصائص كواشف المصادم الفائق ذي الموصلية الفائقة المقترَح آنذاك. وقُدِّم المقترح النهائي في عام ١٩٩٤، وتم تمويله بعد ذلك التاريخ بعامين.

تتشابه هاتان التجربتان في مخططهما الأساسي، لكنهما تختلفان في عمليات التهيئة والتطبيق التفصيلية، وهو ما يتَّضِح بشيء من التفصيل في الشكل ١٣-٤. هذا التكامل يمنح لكل تجربة بعض نقاط القوة المختلفة قليلًا ليتمكَّنَ الفيزيائيون من إعادة فحص نتائج التجربتين. وفي ظل التحديات الهائلة التي تنطوي عليها اكتشافات فيزياء الجسيمات، يكون لتجربتين لهما نفس الأهداف البحثية قدرٌ أكبر من الموثوقية عندما تؤكِّد كلٌّ منهما نتائج الأخرى. وفي حال توصَّلَتْ كلتاهما للنتيجة نفسها، فسيزداد الجميع ثقةً واطمئنانًا.

علاوةً على ما سبق، يوفِّر وجود تجربتين عنصرًا قويًّا للمنافسة، الأمر الذي يذكِّرني به دومًا زملائي من الفيزيائيين التجريبيين؛ فالمنافسة تدفعهم للوصول إلى النتائج على نحو أسرع وأكثر دقةً، هذا فضلًا عن أن أعضاء كل تجربة يتعلَّمون بعضهم من بعض. وستجد أي فكرة جيدة طريقَها إلى كلتا التجربتين، حتى إن اختلَفَت طريقة التنفيذ بعض الشيء في كلٍّ منهما. هذا التنافس والتعاون، مصحوبًا بتكرار أبحاث منفصلة تعتمد على أساليب تكنولوجية وتهيئة مختلفة بعض الشيء، هو السبب وراء اتخاذ القرار بإجراء تجربتين لهما أهداف مشتركة.

أُسأَل عادةً عن موعد إجراء مصادم الهادرونات الكبير لتجاربي وبحثه عن النماذج المحدَّدة التي اقترحتُها برفقة معاونَيَّ. وتكون إجابتي على الفور هي أن المصادم يبحث كافة المقترحات التي قدَّمها آخرون أيضًا، فيعمل الفيزيائيون النظريون على تقديم أهداف بحثية واستراتيجيات جديدة للعثور على الأشياء. ويهدف بحثنا للتعرُّف على كيفية العثور على أي عناصر أو قوًى فيزيائية جديدة عند مستويات أعلى من الطاقة، ليتمكَّنَ الفيزيائيون من التوصُّل إلى النتائج وقياسها وتفسيرها؛ ومن ثَمَّ اكتساب مدارك جديدة بشأن الحقيقة الكامنة وراء كل ذلك، أيًّا كانت. ولا يدرس الآلاف من الفيزيائيين التجريبيين، الذين ينقسمون إلى فِرَق للتحليل، ما إذا كانت المعلومات التي تم التوصل إليها تتلاءم مع النماذج — التي وضعتها أنا أو وضعها أي شخص آخر وتبدو مثيرة للاهتمام — أم لا إلا بعد تسجيل البيانات.

بعد ذلك، يفحص الفيزيائيون النظريون والفيزيائيون التجريبيون البيانات التي تم تسجيلها لمعرفة ما إذا كانت تتماشى مع أي نوع محدَّد من الفرضيات أم لا. ورغم

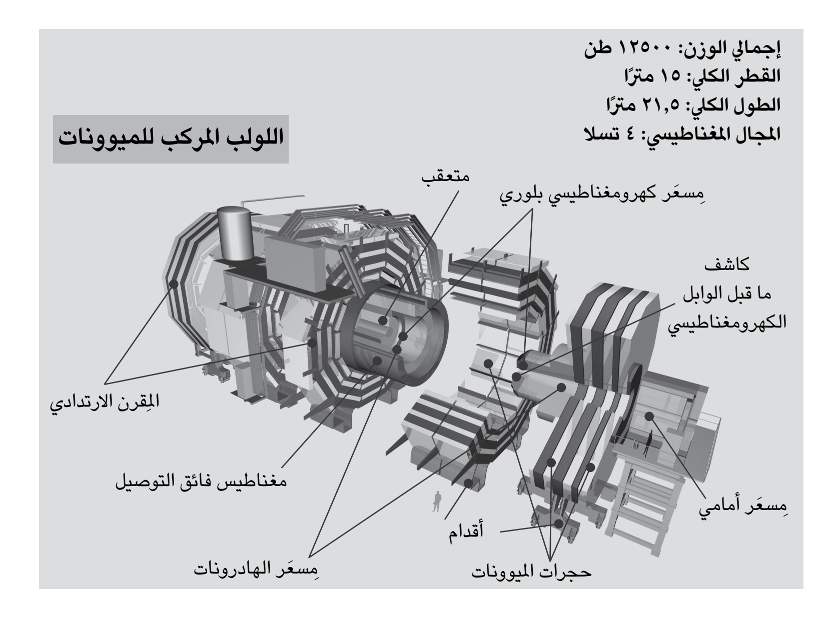
أن الكثير من الجسيمات لا تدوم إلا لجزء من الثانية، ورغم أننا لا نشاهدها مباشَرَةً، يستخدم الفيزيائيون التجريبيون البيانات الرقمية التي تتشكَّل منها هذه «الصور» لتحديد هوية الجسيمات التي يتكوَّن منها قلب المادة، وكيف تتفاعل. وفي ظل التعقيد الذي تتسم به الكواشف والبيانات، سيكون أمام الفيزيائيين التجريبيين الكثير من المعلومات التي عليهم معالجتها. والجزء المتبقي من هذا الفصل مخصَّص لاستعراض ماهية هذه المعلومات بالضبط.

كاشفا أطلس واللولب المركب للميوونات

إلى الآن تتَبَّعْنا رحلة البروتونات بمصادم الهادرونات الكبير، بدءًا من انتزاعها من ذرات الهيدروجين، وصولًا إلى تعجيلها إلى طاقة عالية في الحلقة البالغ محيطها ٢٧ كيلومترًا. والحزمتان المتوازيتان تمامًا لا تتقاطعان أبدًا، وكذلك حزمتا البروتونات اللتان تسيران في اتجاهين معاكسين داخلهما؛ لذا — في عدة مواقع بالحلقة — تعمل المغناطيسات الثنائية القطب على تحويل حزمتَي الجسيمات هاتين عن مسارهما، بينما تعمل المغناطيسات الرباعية الأقطاب على تركيزهما لتلتقي البروتونات الموجودة فيهما وتتفاعل داخل منطقة تقل مساحتها عن ٣٠ ميكرونًا. وتُعرَف النقاط التي تحدث فيها التصادمات بين البروتونات في مركز كل كاشف باسم نقاط التفاعل.

تجهَّز التجارب حول كلِّ نقطةِ تفاعُلٍ من هذه النقاط بهدفِ امتصاص الجسيمات العديدة التي تصدر عن التصادمات المتكرِّرة بين البروتونات، وتسجيلِها (انظر الشكل ٥-١٣ للاطلاع على رسم لكاشف اللولب المركب للميوونات). والكواشف مصمَّمة بشكل أسطواني؛ لأنه رغم أن حزمتَي البروتونات تسيران في اتجاهين متقابلين بنفس السرعة، تنطوي التصادمات على قدر كبير من الحركة الأمامية في كلا الاتجاهين. وفي الواقع، نظرًا لأن البروتونات الفردية أصغر كثيرًا من حجم الحزمة ذاتها، لا تتصادم أغلب البروتونات على الإطلاق، وإنما تواصِل التحرُّك في أنبوب الحُزَم بقدر بسيط فقط من الانحراف. وما يندر حدوثه فقط من تصادم للبروتونات الفردية المتقابلة هو ما نهتم به.

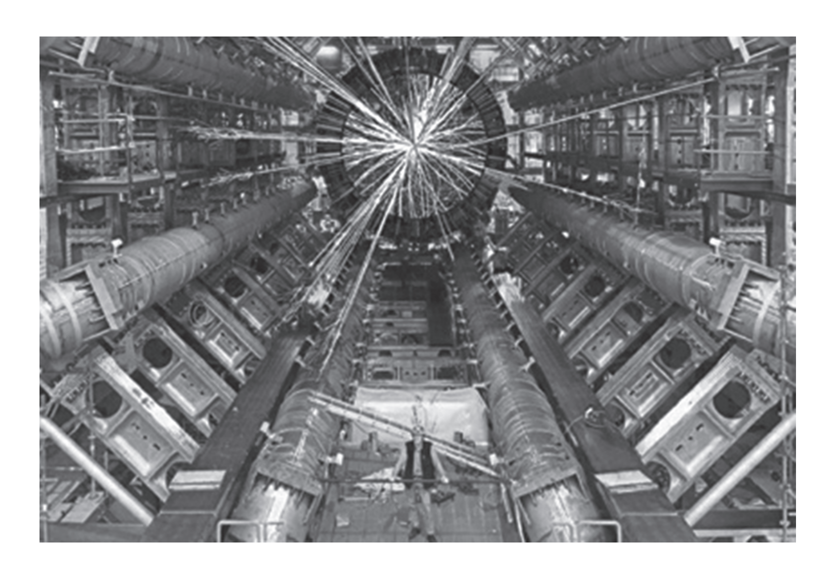
يعني ذلك أنه بالرغم من مواصلة معظم الجسيمات السيرَ في نفس اتجاه الحزمة، فإن الأحداث التي قد تكون ذات أهمية هي التي تسير فيها الجسيمات على نحو متعارض مع اتجاه الحزمة. والكواشف الأسطوانية الشكل مصمَّمة خصوصًا للكشف عن أكبر قدر ممكن من نتائج هذا التفاعل، مع الوضع في الاعتبار الانتشار الكبير للجسيمات



شكل ١٣-٥: صورة بالكمبيوتر للولب المركب للميوونات مُفكَّكًا لعرض كلِّ مكوِّن من مكونات الكاشف (الرسم مُقدَّم من سيرن وتجربة اللولب المركب للميوونات).

على طول الحزمة. ويقع كاشف اللولب المركب للميوونات حول نقطة تصادم بروتونات واحدة تحت سطح الأرض في بلدية سيسي بفرنسا بالقرب من الحدود مع جنيف، في حين تقع نقطة تفاعُل كاشِف أطلس أسفل مدينة ميرين السويسرية القريبة للغاية من مقر سيرن (انظر الشكل ١٣-٦ للاطلاع على محاكاة للجسيمات عند خروجها من التصادم واندفاعها عبر قطاع عرضي بكاشف أطلس).

تتميز جسيمات النموذج القياسي بكتلتها ودورانها وقواها التي تتفاعل من خلالها. وأيًّا كان ما سينتج في النهاية، تعتمد كلتا التجربتين على الكشف عن هذا الناتج من خلال القوى والتفاعلات المعروفة للنموذج القياسي؛ فهذا كل ما يُحتمَل حدوثه. والجسيمات التي لا تحمل أيًّا من هذه الشحنات ستترك منطقة التفاعل دون أن تخلِّف وراءها أي أثر.



شكل ١٣-٦: محاكاة لحدث في كاشف أطلس توضِّح الرذاذ العرضي للجسيمات عبر طبقات الكاشف (يُرجَى الملاحظة أن الشخص الظاهر في الصورة مُستخدَم لتوضيح الحجم، لكن التصادمات لا تحدث أثناء وجود أي شخص داخل التجويف). وتظهر بوضوح في الشكل المغناطيسات الحلقية المميزة. (الصورة مُقدَّمة من سيرن وكاشف أطلس.)

لكن عندما تقيس التجاربُ تفاعلاتِ النموذج القياسي، يمكن التعرُّف على ما مَرَّ بها من جسيمات، وهذا ما صُمِّمت الكواشف لفعله. فيقيس كلٌّ من كاشف أطلس واللولب المركب للميوونات الطاقةَ والزخمَ الخاصَّيْنِ بكلٍّ من الفوتونات والإلكترونات والميوونات والتاوونات والجسيمات المتفاعلة بواسطة القوة القوية التي تضمها تدفقات الجسيمات المصطفة بجوار بعضها البعض وتسير في الاتجاه نفسه. والكواشف المحيطة بمنطقة تصادم البروتونات مُصمَّمة لقياس الطاقة أو الشحنة من أجل تحديد الجسيمات، وتحتوي على إلكترونيات وبرامج وأجهزة كمبيوتر معقَّدَة للتعامُل مع الكميات الهائلة من البيانات. ويتعرَّف الفيزيائيون التجريبيون على الجسيمات المشحونة لأنها تتفاعل مع غيرها من الأجسام الأخرى المشحونة التي نعرف كيف نعثر عليها، هذا فضلًا عن عثورها على أي شيء يتفاعل بواسطة القوة القوية.

تعتمد مكونات الكاشف جوهريًّا على الأسلاك والإلكترونات الناتجة عن التفاعلات مع المواد الموجودة في الكاشف لتسجيل ما مرَّ خلاله. وفي بعض الأحيان، يظهر وابل من الجسيمات المشحونة بسبب إنتاج الكثير من الإلكترونات والفوتونات، وتُؤيَّن المواد أحيانًا بواسطة الشحنات المسجلة، لكن في كلتا الحالتين، تسجِّل الأسلاك الإشارةَ وترسلها لكي يعالجها الفيزيائيون ويحللونها على أجهزة الكمبيوتر الخاصة بهم.

تلعب المغناطيسات كذلك دورًا مهمًّا في كلا الكاشفين؛ فهي ضرورية لقياس إشارة شحنات الجسيمات المشحونة وزخمها. تنحني الجسيمات ذات الشحنات الكهرومغناطيسية في المجال المغناطيسي حسب سرعة تحركها، أما الجسيمات ذات الزخم الأكبر فتتحرك على نحو أكثر استقامة، بينما تنحني الجسيمات ذات الشحنات المتضادة في اتجاهات متضادة. ونظرًا لأن الجسيمات في مصادم الهادرونات الكبير تتسم بقدر كبير من الطاقة (والزخم)، يحتاج الفيزيائيون التجريبيون مغناطيساتٍ قويةً للغاية ليتمكَّنوا من قياس الانحناء البسيط لمسارات الجسيمات المشحونة العالية الطاقة.

أما اللولب المركب للميوونات، فهو أصغر حجمًا من كاشف أطلس، لكنه أثقل وزنًا؛ إذ يصل وزنه إلى ١٢٥٠٠ طن متري، ويبلغ طوله ٢١ مترًا، وقطره ١٥ مترًا. فهو أصغر لا شك من كاشف أطلس، لكن حجمه مع ذلك يكفي لتغطية ملعب تنس كامل.

وما يميِّز اللولب المركب للميوونات هو مجاله المغناطيسي القوي البالغة شدته ٤ تسلا، وهو ما تشير إليه كلمة «اللولب» في اسم الكاشف. واللولب في الجزء الداخلي من الكاشف يتكوَّن من بكرة أسطوانية بقُطْر يبلغ ستة أمتار، مكوَّنة من كابل فائق التوصيل. ويُعَدُّ المقرن الارتدادي، الذي يمر عبر الجزء الخارجي من الكاشف، من الأشياء المذهلة أيضًا، ويرجع إليه قدر كبير من الوزن الهائل للكاشف، وكمية الحديد الموجودة به تفوق ما يوجد في برج إيفل بباريس.

لعلك تتساءل أيضًا عن كلمة «الميوونات» في اسم «اللولب المركب للميوونات» (هذا ما فعلته أنا أيضًا عندما سمعته للمرة الأولى). إن التعرف السريع على الإلكترونات والميوونات — التي هي جسيمات شبيهة بالإلكترونات، لكنها أثقل وزنًا وتنفُذ وصولًا إلى الحدود الخارجية للكاشف — يمكن أن يكون له أهمية في الكشف عن جسيمات جديدة؛ وذلك لأن هذه الجسيمات العالية الطاقة تصدر أحيانًا عندما تتحلَّل الأجسام الثقيلة. ونظرًا لأنها لا تتفاعل بواسطة القوة النووية القوية، فستكون على الأرجح شيئًا جديدًا؛ لأن البروتونات لا يمكن أن تكوِّنها من تلقاء نفسها؛ ومن ثَمَّ يمكن لهذه الجسيمات

القابلة للتحديد أن تشير إلى وجود جسيم متحلل مثير للاهتمام نتج عن التصادم. وقد أوليت الميوونات العالية الطاقة اهتمامًا خاصًّا عند تصميم المجال المغناطيسي باللولب المركب للميوونات، وذلك لكي يتمكَّن هذا المجال من استهدافها. يعني ذلك أنه سيسجل البيانات المتعلِّقة بأي حدث يتضمن هذه الميوونات، حتى إذا اضطر لاستبعاد الكثير من البيانات الأخرى.

يعبِّر اسم كاشف أطلس، شأنه شأن اللولب المركب للميوونات، عن المغناطيس الموجود به؛ لأن المجال المغناطيسي الكبير مهم لعمله أيضًا. وكلمة «أطلس» بالإنجليزية ATLAS هي اختصار للحروف الأولى للاسم A Toroidal LHC Apparatus الذي يعني بالعربية «جهاز مصادم الهادرونات الكبير الحلقي». وكلمة «الحلقي» هنا تشير إلى المغناطيسات التي يتسم مجالها بأنه أضعف من المجال المغناطيسي باللولب المركب للميوونات، لكنه يمتدُّ على نطاق مساحة شاسعة. والحلقات المغناطيسية الضخمة تجعل أطلس أكبر حجمًا من اللولب المركب للميوونات، بل هو في الواقع الجهاز التجريبي الأكبر على الإطلاق. فيبلغ طوله ٤٦ مترًا، وقطره ٢٥ مترًا، ويتلاءم بشكل محكم داخل التجويف المعَدِّ له البالغ طوله ٥٥ مترًا، وارتفاعه ٤٠ مترًا. أما فيما يتعلق بوزنه البالغ ٧٠٠٠ طن متري، فهو يزيد قليلًا عن نصف وزن اللولب المركب للميوونات.

ولقياس جميع خصائص الجسيمات، تبرز مكونات الكاشف الأسطواني المتزايدة في حجمها من المنطقة التي تحدث فيها التصادمات. ويحتوي كلٌّ من كاشف أطلس واللولب المركب للميوونات على أجزاء مغمورة عديدة مصمَّمة لقياس مسار الجسيمات أثناء مرورها، وقياس شحنات هذه الجسيمات. وأول ما تواجِهه الجسيمات الناتجة عن التصادم هو «متعقبات المسار الداخلية»، التي تقيس بدقة مسارات الجسيمات المشحونة بالقرب من نقطة التفاعل، ثم تمر على «المِسعَرات» التي تقيس الطاقة التي ترسبها الجسيمات المتوقفة بالفعل، وبعد ذلك تمر على «كواشف الميوونات» الموجودة عند الحواف الخارجية، وتقيس طاقة الميوونات العالية الاختراق. وكلٌّ من هذه العناصر يتكوَّن من طبقات متعددة لزيادة دقة كل قياس. سوف نستعرض الآن التجربتين بدءًا من الكواشف الموجودة في أوغل نقطة بهما، وصولًا إلى أقصى نقطة خارجية وفقًا لما يُقاس من الحزم، ونوضِّح كيف يتحوَّل رذاذ الجسيمات الناتجة عن التصادم إلى معلومات مسجَّلَة قابلة للتحديد.

متعقبات المسار

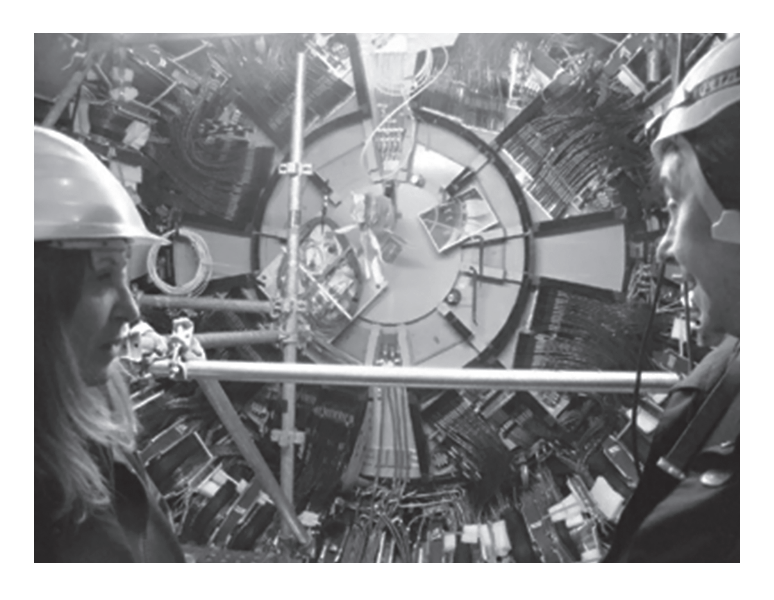
إن أوغل أجزاء الكاشف هي متعقبات المسار التي تسجِّل مواقع الجسيمات المشحونة عند خروجها من منطقة التفاعل حتى يمكن بناء مساراتها وقياس زخمها، وفي كلا الكاشفين (أطلس واللولب المركب للميوونات)، يتكوَّن متعقِّب المسار من مكونات عديدة متحدة المركز.

والطبقات الأقرب للحُزَم ونقاط التفاعل هي الأدق في تقسيمها، وينتج عنها معظم البيانات. تتمركز «البكسلات» السيليكونية في هذه المنطقة بأوغل نقطة بالكاشف، ذات عناصر الكشف المتناهية الدقة، وتبدأ من بعد بضعة سنتيمترات من أنبوب الحزم. صُمِّمت هذه البكسلات من أجل التعقب المتناهي الدقة على مسافة قريبة للغاية من نقطة التفاعل؛ حيث تكون كثافة الجسيمات في أعلى درجاتها. ويُستخدَم السيليكون في الإلكترونيات الحديثة لما يمكن أن ينقشه من تفاصيل دقيقة في كل قطعة صغيرة، وهذا هو السبب نفسه وراء استخدام كواشف الجسيمات له. صُمِّمت البكسلات بكاشفَيْ أطلس واللولب المركب للميوونات للكشف عن الجسيمات المشحونة بدقة عالية للغاية. وعن طريق الربط بين النقاط بعضها ببعض، وبنقاط التفاعل التي نشأت منها، يمكن للفيزيائيين التجريبيين الوصول إلى المسارات التي تتبعها الجسيمات في أوغل منطقة قريبة من الحزمة.

تتألَّف الطبقات الثلاث الأولى من كاشف اللولب المركب للميوونات — التي يصل نصف قطرها إلى ١١ سنتيمترًا — من بكسلات حجمها ١٠٠ في ١٥٠ ميكرومترًا، وعددها الإجمالي ٦٦ مليونًا. وكاشف البكسلات الداخلي بتجربة أطلس على الدرجة نفسها من الدقة أيضًا، وأصغر وحدة يمكن استخلاصها في الكاشف الأوغل بتجربة أطلس هي بكسل بحجم ٥٠ في ٤٠٠ ميكرومتر، وإجمالي عدد البكسلات في أطلس يبلغ حوالي ٨٢ مليونًا؛ أي ما يزيد قليلًا عن عددها في اللولب المركب للميوونات.

وتستلزم الكواشف البكسلية، بما تحويه من عشرات الملايين من العناصر، قراءات إلكترونية معقَّدَة. وقد مثَّلَتِ السرعةُ والمدى اللازمان لنُظُم القراءة، بالإضافة إلى الإشعاع الهائل الذي ستتعرض له الكواشف الداخلية، أكبر التحديات في كلا الكاشفين (انظر الشكل ١٣-٧).

فنظرًا لوجود ثلاث طبقات في متعقبات المسار الداخلية هذه، تسجِّل هذه المتعقبات ثلاث «إصابات» لأي جسيم مشحون وثابت لفترة كافية يمر عبرها. وتستمر عمليات



شكل ١٣-٧: سينثيا دا فيا والمهندس دومينيكو داتولا يقفان على سقالة أمام أحد حواجز المتعقب السيليكوني في اللولب المركب للميوونات الذي تتصل به الكابلات.

التعقب بوجه عام وصولًا إلى متعقب خارجي يتجاوز طبقات البكسل، لإصدار إشارة قوية يمكن أن تكون مرتبطة بأحد الجسيمات على نحو مؤكد.

لقد أوليت أنا ومعاونِي ماثيو باكلي اهتمامًا كبيرًا بهندسة متعقبات المسار الداخلية، وأدركنا أنه بالصدفة البحتة، بعض الجسيمات المشحونة الجديدة المُقدَّر ظهورها، والتي تتحلل بفعل القوة الضعيفة لتصير نظيرًا متعادلًا، من المفترض أن تترك مسارًا لا يتجاوز طوله بضعة سنتيمترات. ومعنى ذلك أنه في هذه الحالات الخاصة، لا يمكن أن تمتد المسارات إلا عبر متعقب المسار الداخلي، بحيث تكون المعلومات المقروءة في هذا الجهاز هي كل المعلومات المتوفرة. وقد درسنا التحديات الأخرى التي واجَهَها الفيزيائيون التجريبيون الذين لم يكن أمامهم ما يعتمدون عليه سوى البكسلات، وهي أوغل الطبقات بالكاشف الداخلي.

لكن أغلب الجسيمات المشحونة تستمر فترة من الزمن تكفي لوصولها إلى مكون متعقب المسار التالي؛ لذلك تسجل الكواشف مسارًا أطول بكثير؛ ولهذا السبب يوجد خارج

الكواشف البكسلية الداخلية ذات الدقة العالية الممتدة في اتجاهين، أشرطةُ سيليكون غير متماثلة الحجم تمتد أيضًا في الاتجاهين، ويكون أحد هذين الاتجاهين أكثر وعورةً. تتماشى الأشرطة الأطول مع الشكل الأسطواني للتجربة، وتمكِّن من تغطية مساحة أكبر من التجربة (يجدر التذكُّر هنا أن المنطقة تزداد حجمًا مع ازدياد حجم نصف القطر).

يتألَّف المتعقب السيليكوني في اللولب المركب للميوونات من ١٣ طبقة إجمالًا في المنطقة المركزية، و١٤ طبقة في المنطقتين الأمامية والخلفية. بعد الطبقات الثلاث الأولى المبكسلة بدقة التي وصفناها فيما سبق، تمتد الطبقات الأربع التالية التي تحتوي على أشرطة السيليكون على مدى نصف قطر يبلغ طوله ٥٥ سنتيمترًا. وعناصر الكاشف هنا هي أشرطة يبلغ طولها ١٠ سنتيمترات، وعرضها ١٨٠ ميكرومترًا. والطبقات الست المتبقية تكون أقل دقةً في الاتجاه الأكثر وعورةً، وتحتوي على أشرطة يصل طولها إلى ٢٠ سنتيمترًا، وتتنوع في عرضها ما بين ٨٠ و٢٠٥ ميكرومترات، مع امتدادها لنصف قطر يبلغ طوله ١٫١ متر، وإجمالي عدد الأشرطة في الكاشف الداخلي للَّولب المركب للميوونات ٩٫٦ ملايين شريط. تلعب هذه الأشرطة دورًا مهمًّا في بناء مسارات أغلب الجسيمات المشحونة التي تمر عبرها. وفي المجمل، يحتوي اللولب المركب للميوونات على سيليكون يكفي لتغطية ملعب تنس كامل، ما يُعَدُّ تقدُّمًا ملحوظًا مقارَنَةً بأكبر كاشف سيليكوني سابق، والذي لم يتجاوز حجمه مترين مكعبين فقط.

ونصف قطر الكاشف الداخلي بتجربة أطلس أقصر قليلًا؛ إذ يبلغ مترًا واحدًا، ويصل طوله إلى سبعة أمتار. وكما هو الحال في اللولب المركب للميوونات، خارج طبقات البكسل السيليكونية الداخلية الثلاث، يتألَّف متعقِّب المسار شبه الموصل من أربع طبقات من أشرطة السيليكون. لكن في كاشف أطلس، يبلغ حجمها ١٢٫٦ سنتيمترًا في ٨٠ ميكرومترًا، والمساحة الإجمالية لمتعقب المسار شبه الموصل ضخمة أيضًا؛ إذ تبلغ ٦١ مترًا مربعًا. وبينما تتسم الكواشف البكسلية بفائدتها في تحديد القياسات الدقيقة بالقرب من نقاط التفاعل، يتسم متعقب المسار شبه الموصل بأهمية بالغة في التحديد الكلي للمسار بسبب المنطقة الكبيرة التي يغطيها بدقة هائلة (وإن كان ذلك في اتجاه واحد فقط).

وعلى عكس اللولب المركب للميوونات، الكاشف الخارجي لجهاز أطلس ليس مصنوعًا من السيليكون. فمتعقب الأشعة العبورية — الذي يمثِّل المكون الخارجي الأقصى للكاشف الداخلي — يتكوَّن من أنابيب مملوءة بالغاز، ويعمل كمتعقب وكاشف للأشعة العبورية. تُقاس مسارات الجسيمات المشحونة عندما تؤين تلك الجسيماتُ الغازَ

الموجود في الأنابيب البالغ حجمها ١٤٤ سنتيمترًا في ٤ ملِّيمترات، مع وجود أسلاك في منتصفها للكشف عن التأين. وهنا أيضًا توفِّر هذه الأسلاك أعلى مستوًى من الدقة في الاتجاه العرضي. تقيس الأنابيب المسارات بدقة تبلغ ٢٠٠ ميكرومتر؛ أي أقل من دقتها في متعقب المسار الموجود بأوغل نقطة في الكاشف، لكنها تغطِّي منطقة أكبر بكثير. تميِّز الكواشف أيضًا بين الجسيمات التي تتحرك بسرعة قريبة للغاية من سرعة الضوء، والتي تنتج ما يُسمَّى بالأشعة العبورية. يفرق ذلك بين الجسيمات ذات الكتل المختلفة؛ نظرًا لأن الجسيمات الأخف من شأنها التحرُّك على نحو أسرع بوجه عام، ويساعد ذلك في التعرف على الإلكترونات.

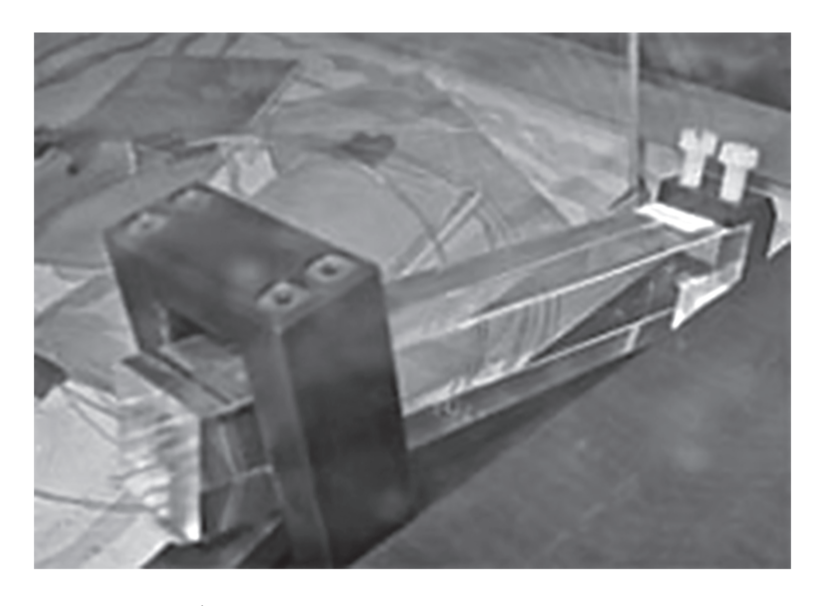
إذا شعرت بشيء من التشتُّت بسبب هذا القدر الهائل من التفاصيل، فعليك أن تتذكَّر أن هذه المعلومات تزيد على ما يجب على الفيزيائيين أنفسهم معرفته، لكنها تمنحك فكرةً عن مدى ضخامة هذه التجارب ودقتها، هذا فضلًا عن أهميتها لأي شخص يعمل على مكوِّن معين من مكونات الكاشف. لكن حتى مَن لديهم أكبر قدر من الإلمام بمكون واحد لا يتابعون بالضرورة كافة المكونات الأخرى، وهذا ما علمته بالمصادفة عندما كنتُ أحاوِل تعقُّبَ بعض صور الكاشف والتأكُّد من دقة بعض الرسوم؛ لذا لا تبتئس إذا لم تستوعب هذه المعلومات من المرة الأولى؛ فبالرغم من تنسيق بعض الخبراء للتشغيل الكلي، لا يمتلك الكثير من الفيزيائيين التجريبيين بالضرورة جميعَ التفاصيل.

المِسعَر الكهرومغناطيسي

بمجرد أن يمر الجسيم بمتعقبات المسار الثلاثة، يكون الجزء التالي الذي يواجِهه في رحلته الإشعاعية نحو الخارج هو المِسعَر (الكالوريمتر) الكهرومغناطيسي. يسجل هذا المِسعَر الطاقةَ التي ترسبها الجسيمات المشحونة والمتعادلة التي تتوقف عنده — لا سيما الإلكترونات والفوتونات — والموقع الذي خلَّفت فيه هذه الطاقة. وتبحث آلية الكشف عن رذاذ الجسيمات الذي تنتجه الإلكترونات والفوتونات الساقطة عند تفاعلها مع مواد الكاشف، ويصدر هذا الجزء من الكاشف معلوماتِ تعقُّبٍ دقيقةً عن هذه الجسيمات من حيث طاقتها وموقعها.

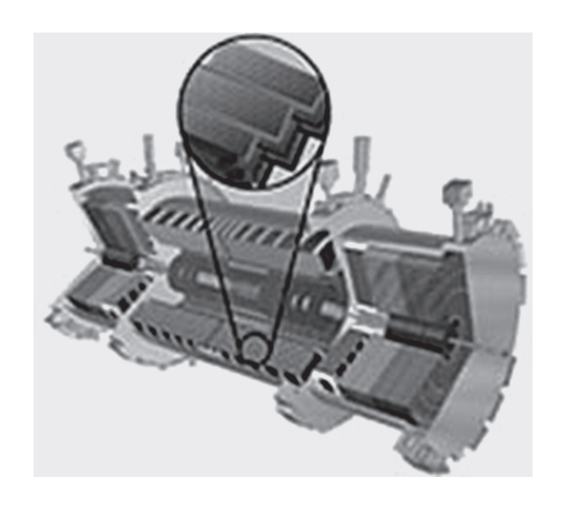
والمادة المُستخدَمة في المِسعَر الكهرومغناطيسي الموجود في تجربة اللولب المركَّب للميوونات أعجوبة في حدِّ ذاتها، فهي مصنوعة من بلورات تنجستات الرصاص التي اختيرت لكثافتها ووضوحها في الوقت ذاته؛ الأمر اللازم بالضبط لإيقاف الإلكترونات

والفوتونات والكشف عنها عند وصولها، ويمكنك إدراك ذلك من الصورة التي التقطتُها بنفسي والموضحة في الشكل ١٣-٨. تكمن الروعة هنا في الوضوح المذهل لهذه البلورات، لعلك لم تَرَ من قبلُ مادةً بهذا القدر من الكثافة والشفافية في الوقت نفسه. أما السبب وراء فائدة هذه البلورات، فهو أنها تقيس الطاقة الكهرومغناطيسية بقدر هائل من الدقة، الأمر الذي قد يثبت أهميته في العثور على جسيم هيجز المُحيِّر مثلما سنوضِّح في الفصل السادس عشر من هذا الكتاب.



شكل ١٣-٨: صورة فوتوغرافية لبلورة تنجستات الرصاص المُستخدَمة في المِسعَر الكهرومغناطيسي باللولب المركب للميوونات.

يستخدم كذلك كاشف أطلس الرصاص لإيقاف الإلكترونات والفوتونات؛ فتعمل التفاعلات في هذه المادة الماصة على تحويل الطاقة من المسار المشحون الأولي إلى وابل من الجسيمات التي يتم تبيُّن طاقتها بعد ذلك. ويُستخدَم بعد ذلك الأرجون السائل — وهو غاز نبيل لا يتفاعَل كيميائيًّا مع العناصر الأخرى، وشديد المقاومة للإشعاع — لأخذ عينة من طاقة الوابل بهدف استنتاج طاقة الجسيمات الساقطة.



شكل ١٣-٩: الهيكل الشبيه بالأكورديون للمِسعَر الكهرومغناطيسي في كاشف أطلس.

وبالرغم من ميولي النظريَّة، أذهلتني حقًّا رؤية هذا العنصر من عناصر الكاشف في تجربة أطلس أثناء تجوُّلي فيها. وقد ساهمت فابيولا في التطوير والإنشاء الريادي للتركيب الهندسي الحديث لهذا المِسعَر الذي يتكوَّن من طبقات شعاعية من ألواح الرصاص الشبيهة بالأكورديون، وتفصلها طبقات رفيعة من الأرجون السائل والإلكترودات. ووصفت فابيولا كيف يسرع هذا التركيب الهندسي من قراءة الإلكترونيات؛ نظرًا لأن الإلكترونيات قريبة في طبيعتها كثيرًا من عناصر الكاشف (انظر الشكل ١٣-٩).

مِسعَر الهادرونات

تأتي الآن المحطة التالية في رحلتنا إلى الخارج بعيدًا عن أنبوب الحُزَم، وهي مِسعَر الهادرونات. يقيس هذا المِسعَر طاقةَ الجسيمات الهادرونية ومواقعها — وهي الجسيمات التي تتفاعل بواسطة القوة القوية — وإن كان يفعل ذلك على نحو أقل دقةً بكثير من قياسات طاقة الإلكترونات والفوتونات التي يُجرِيها المِسعَر الكهرومغناطيسي. وهذا أمر حتمي؛ فمِسعَر الهادرونات ضخم؛ إذ يبلغ قطره مثلًا في كاشف أطلس ثمانية أمتار وطوله ١٢ مترًا. وتقسيمه بالدقة ذاتها التي يتسم بها تقسيم المِسعَر الكهرومغناطيسي

أمرٌ مكلِّف على نحو مُعجِز؛ لذلك لزم خفض درجة دقة قياس المسارات. وفوق كل ذلك، فإن قياسات الطاقة أصعب في الجسيمات المتفاعلة بواسطة القوة القوية، بغض النظر عن التقسيم. ويرجع ذلك إلى أن الطاقة في وابل الهادرونات تتأرجح بمعدل أكبر.

يحتوي مِسعَر الهادرونات في اللولب المركب للميوونات على طبقات من مادة كثيفة — نحاس أو صلب — تعمل بالتبادل مع بلاط وامضٍ بلاستيكي يسجِّل طاقة الهادرونات التي تمر به وموقعها، بناءً على كثافة الضوء الوامض. والمادة الماصَّة الموجودة في المنطقة المركزية بكاشف أطلس هي الحديد، لكن مِسعَر الهادرونات به يعمل بنفس الطريقة إلى حدٍّ كبير.

كاشف الميوونات

العناصر التي تقع بأقصى الحدود الخارجية لأي كاشف ذي أغراض عامة هي حجرات الميوونات. ولعلك تتذكر ما ذكرناه من قبلُ عن أن الميوونات هي جسيمات مشحونة مثل الإلكترونات، لكنها أثقل وزنًا منها بمقدار ٢٠٠ مرة. ولا تتوقف الميوونات في المِسعَرات الهادرونية أو الكهرومغناطيسية، وإنما تنطلق بسرعة فائقة عبر المنطقة الخارجية السميكة للكاشف (انظر الشكل ١٣-١٠).

وللميوونات العالية الطاقة فائدةٌ كبيرة عند البحث عن جسيمات جديدة؛ وذلك لأنها — على عكس الهادرونات — معزولة على نحو كافٍ مما يجعلها نقية بدرجة تسمح باكتشافها وقياسها. ويرغب الفيزيائيون التجريبيون في تسجيل كل الأحداث المتعلقة بالميوونات العالية الطاقة في الاتجاه العرضي؛ لأن الميوونات ترتبط على الأرجح بالتصادمات الأكثر أهميةً. ويمكن لكواشف الميوونات أيضًا أن تفيد في الكشف عن أي جسيم مشحون ثابت ثقيل الوزن يتمكَّن من الوصول إلى خارج الكاشف.

تسجِّل الكواشفُ المسمَّاة حجرات الميوونات الإشاراتِ التي تخلِّفها الميوونات التي تصل إلى هذه الكواشف الموجودة بأقصى الجانب الخارجي، وهي تتشابه في بعض الجوانب مع الكاشف الداخلي بما تحويه من أجهزة تعقُّب ومجالات مغناطيسية تعمل على إحناء مسارات الميوونات حتى يمكن قياس مساراتها وزخمها. لكن في حجرات الميوونات، المجال المغناطيسي مختلف، وسُمك الكاشِف أكبر بكثير؛ ما يسمح بإجراء قياسات للانحناءات الأصغر حجمًا؛ ومن ثَمَّ الجسيمات الأعلى في زخمها (تنحني الجسيمات ذات الزخم العالي بدرجة أقل في المجال المغناطيسي). وتمتد حجرات الميوونات



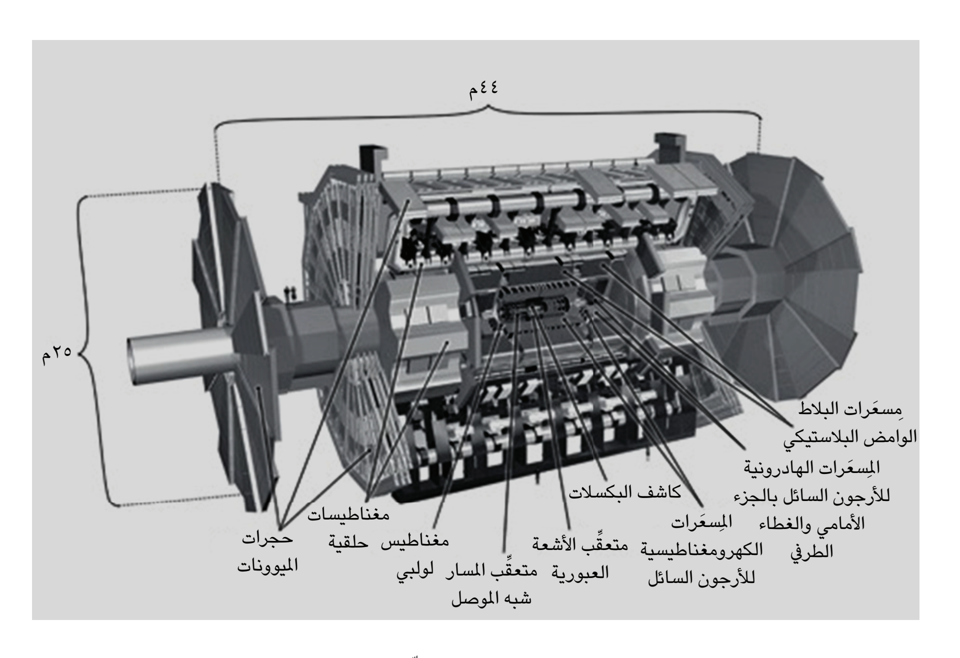
شكل ١٣-١٠: بكرة الارتداد المغناطيسية في اللولب المركب للميوونات متشابِكةٌ مع كاشف الميوونات (الصورة توضِّح جميع الأجزاء وهي تحت الإنشاء).

في اللولب المركب للميوونات من حوالي ثلاثة أمتار إلى نصف القطر الخارجي للكاشف عند مسافة ٧٫٥ أمتار، في حين تمتد في كاشف أطلس من أربعة أمتار إلى الجانب الخارجي لذلك الكاشف عند مسافة ١١ مترًا. وهذه الهياكل الضخمة تسمح بقياس مسارات الجسيمات البالغ طولها ٥٠ ميكرومترًا.

الأغطية الطرفية

آخِر عناصر الكاشف التي سنتناولها بالوصف هي الأغطية الطرفية. والأغطية الطرفية هي كواشف موجودة بالطرفين الأمامي والخلفي بالتجارب (انظر الشكل ١٣-١١ للاطلاع على الهيكل الكلي). لقد أنهينا رحلتنا نحو الخارج بعيدًا عن حُزَم الجسيمات؛ إذ كانت كواشف الميوونات محطتنا الأخيرة في هذا الاتجاه، وسننتقل الآن للتقدُّم على

امتداد محور الكواشف الأسطوانية الشكل، وصولًا إلى الطرفين اللذين يغطيانها. فالأجزاء الأسطوانية للكواشف «مغلقة» بكواشف تغطِّي المنطقتين الطرفيتين، لضمان تسجيل أكبر قدر ممكن من الجسيمات. ولما كانت الأغطيةُ الطرفية المكوناتِ الأخيرةَ التي يتم تحريكها إلى مواقعها النهائية في الكاشف، فقد تمكَّنْتُ من رؤية الطبقات العديدة الموجودة داخل الكاشف عند زيارتي له في عام ٢٠٠٩.



شكل ١٣-١١: صورة بالكمبيوتر لكاشف أطلس توضِّح الطبقات العديدة والأغطية الطرفية به منفصلة. (الصورة مُقدَّمة من سيرن وتجربة أطلس).

توضع الكواشف في هذه الأطراف لضمان قياس تجاربِ مصادمِ الهادرونات الكبير زخمَ جميعِ الجسيمات. والهدف من ذلك هو جعل أجهزة التجارب «محكمة السد»، بمعنى وجود تغطية في جميع الاتجاهات دون أي ثغرات أو مناطق مُغفَل عنها. والقياسات المحكمة تضمن إمكانية اكتشاف جميع الجسيمات، بما في ذلك الجسيمات غير المتفاعلة أو الضعيفة التفاعل. وفي حال ملاحظة زخم عرضي «لم يكن موجودًا»،

يعني ذلك إنتاجَ جسيم أو أكثر ليس لهما تفاعلات يمكن الكشف عنها بشكل مباشِر، مثل هذه الجسيمات لها زخم، وهذا الزخم يساعد التجارب في التعرُّف على وجودها.

وإذا عرفت أن الكاشف يقيس جميع قيم الزخم العرضية، وأن الزخم المتعامِد على الحزمة لا يُحتفَظ به بعد التصادم، فلا بد أن شيئًا ما قد اختفى دون الكشف عنه أو حمَلَه الزخم بعيدًا. والكواشف — كما رأينا — تقيس الزخم في الاتجاهات المتعامدة بعناية شديدة، والمِسعَرات الموجودة في المنطقتين الأمامية والخلفية تضمن إحكام السد عن طريق ضمان عدم إغفال سوى أقل قدر ممكن من الطاقة والزخم العمودي على الحُزَم.

يحتوي اللولب المركب للميوونات على أجهزة امتصاص مصنوعة من الصلب وألياف الكوارتز في الأطراف. تعمل هذه العناصر على فصل مسارات الجسيمات على نحو أفضل لأنها أكثر كثافةً. والنحاس الموجود في الأغطية الطرفية من المواد المُعاد تدويرها، وكان يُستخدَم في الأساس في قذائف المدفعية الروسية. أما جهاز كاشف أطلس، فيستخدم مِسعَرات الأرجون السائل في المنطقة الأمامية ليس من أجل الكشف عن الإلكترونات والفوتونات فقط، وإنما الهادرونات أيضًا.

المغناطيسات

ما تبقَّى لنا وصفه بمزيد من التفصيل في كلا الكاشفين هو المغناطيسات التي استمدت التجربتان اسميهما منها. والمغناطيس ليس عنصرًا كاشفًا؛ بمعنى أنه لا يسجِّل خصائص الجسيمات، لكنه ضروري في عملية الكشف عن الجسيمات؛ لأنه يساعد في تحديد الزخم والشحنة، وهي الخصائص اللازمة للتعرف على مسارات الجسيمات ووصفها. تنحني الجسيمات في المجالات المغناطيسية، فتظهر مساراتها منحنيةً وليست مستقيمة، ومقدار الانحناء واتجاهه يعتمدان على طاقة الجسيمات وشحنتها.

والمغناطيس اللولبي الضخم في تجربة اللولب المركب للميوونات المصنوع من بكرات النيوبيوم والتيتانيوم الفائقة التوصيل يبلغ طوله ١٢٫٥ مترًا وقطره ستة أمتار. هذا المغناطيس هو السمة المميزة للكاشف، وهو الأكبر من نوعه على الإطلاق. يحتوي الملف اللولبي على بكرات سلكية تحيط بقلب معدني، وينتج مجالًا مغناطيسيًّا عند توصيله بالكهرباء، والطاقة المخزَّنَة في هذا المغناطيس تساوي الطاقة التي ينتجها نصف طن متري من مادة تي إن تي. وغني عن الذكر أنه قد اتُّخِذت الاحتياطات اللازمة تحسُّبًا

لتعرُّض المغناطيس للإخماد وفقدانه فجأةً الموصلية الفائقة التي يتمتع بها. فاختُبِر الملف اللولبي بنجاح في مجال مغناطيسي تبلغ شدته ٤ تسلا في سبتمبر ٢٠٠٦، لكنه سيتم تشغيله في مجال مغناطيسي أقل شدة (٣٫٨ تسلا) لضمان استمراريته فترةً أطول.

وهذا الملف اللولبي كبير على نحو يسمح له بالإحاطة بطبقات المِسعَر والمتعقب. على الجانب الآخَر، توجد كواشف الميوونات على المحيط الخارجي للكاشف خارج الملف اللولبي، ومع ذلك تتشابك الطبقات الأربع لكاشف الميوونات مع هيكل حديدي ضخم يحيط بالبكرات المغناطيسية ويحتوي هذا المجال ويوجِّهه، مما يضمن الاتساق والاستقرار. ويصل نصف قطر هذا المِقرن المغناطيسي الارتدادي، الذي يبلغ طوله ٢١ مترًا وقطره ١٤ مترًا، إلى نصف القطر الكامل للكاشف البالغ طوله سبعة أمتار. وعمليًّا، هو يشكِّل أيضًا جزءًا من نظام الميوونات؛ نظرًا لأن الميوونات من المفترض أنها الجسيمات المشحونة الوحيدة التي تتخلَّل أطنان الحديد البالغة ١٠ آلاف طن متري، وتعبر حجرات الميوونات (وإن كانت الهادرونات العالية الطاقة تدخل أيضًا هذه الحجرات، الأمر الذي يزعج الفيزيائيين التجريبيين). يتسبب المجال المغناطيسي الناتج عن المقرن في إحناء الميوونات في الكاشف الخارجي، ونظرًا لأن المقدار الذي تنحني به الميوونات في المجال يعتمد على زخمها، يلعب المقرن دورًا محوريًّا في قياس طاقة الميوونات وزخمها. ويلعب المغناطيس الضخم المستقر هيكليًّا دورًا آخَر أيضًا؛ ألَا وهو تدعيم التجربة وحمايتها من القوى الهائلة الناتجة عن المجال المغناطيسي بها.

على الجانب الآخَر، يختلف تركيب مغناطيس أطلس كليةً؛ ففي تجربة أطلس، ثمة نظامان مختلفان من المغناطيسات يتم استخدامهما، وهما: ملف لولبي بشدة ٢ تسلا يحيط بأنظمة التعقب، ومغناطيسات حلقية ضخمة بالمناطق الخارجية تقع بين حجرات الميوونات. وعندما تُلقِي نظرة على صور كاشف أطلس (أو التجربة ذاتها)، تجد أبرز العناصر هي هذه الهياكل الحلقية الضخمة الثمانية (الموضحة في الشكل ١٣-٦)، والحلقتان الأخريان اللتان تغطيان الطرفين. يمتد المجال المغناطيسي الناتج عن هذه الهياكل الحلقية ٢٦ مترًا على امتداد محور الحزم، بدايةً من مقياس طيف الميوونات الموجود على بُعْد ١١ مترًا في اتجاه الحزم.

من أكثر القصص التي سمعتها عند زيارتي لتجربة أطلس إثارة للاهتمام قصةٌ تتعلق بكيفية إنزال المغناطيسات في البداية بواسطة فرق الإنشاء؛ إذ كانت المغناطيسات بيضاوية (عند رؤيتها من الجانب) عندما بدأ العمل بالمشروع. لكن المهندسين أخذوا في

الاعتبار عنصر الجاذبية قبل تركيبها، ما مكَّنهم من إجراء توقعات صحيحة بأنه بعد بعض الوقت، سيصير شكل المغناطيسات أكثر استدارة نظرًا لحجمها.

من القصص الأخرى التي أذهلتني أيضًا وضع مهندسي تجربة أطلس في الاعتبار الارتفاع الطفيف في أرضية التجويف بنحو واحد ملِّيمتر كل عام، بسبب الضغط الهيدروستاتيكي الناتج عن حفر التجويف؛ فصمَّموا التجربة بحيث تؤدِّي هذه الحركة البسيطة إلى توصيل الجهاز إلى الوضع المثالي في عام ٢٠١٠، وهو التاريخ الذي خُطِّط في البداية لتشغيل الكاشف فيه بطاقته الكاملة، لكن ذلك لم يحدث في ظل التأخيرات التي شهدها مصادم الهادرونات الكبير. أما الآن، فقد استقرت المياه الموجودة تحت التجربة بحيث توقفت التجربة عن الحركة، وبذلك ستظل في المكان السليم طوال التشغيل. وبالرغم من تحذير يوجي بيرا من «مدى صعوبة التنبؤات، خاصةً بشأن المستقبل»،[1] فقد أصاب مهندسو كاشف أطلس في تنبؤاتهم.

الحسابات

لا يكتمل أي وصف لمصادم الهادرونات الكبير دون تناول قوته الحاسوبية الهائلة. فبالإضافة إلى الأجهزة المميزة التي تنطوي عليها المِسعَرات ومتعقبات المسار ونُظُم الميوونات والمغناطيسات التي وصفناها فيما سبق، يلعب الحساب المُنسَّق حول العالم دورًا مهمًّا في التعامل مع الكمية الهائلة من البيانات التي تصدر عن التصادمات.

فمصادم الهادرونات الكبير لا يزيد في طاقته عن مصادم تيفاترون — الذي كان الأعلى في مستوى الطاقة في السابق — سبع مرات فحسب، لكن معدل الأحداث التي يتسبَّب فيها مصادم الهادرونات الكبير أسرع ٥٠ مرة من تيفاترون؛ لذا يلزم على هذا المصادم التعامُل مع صور لأحداث متناهية الدقة تقع بمعدل يصل إلى نحو مليار تصادم في الثانية الواحدة، و«صورة» كل حدث تحتوي على حوالي واحد ميجابايت من المعلومات.

هذا القدر من البيانات أكبر بكثير مما يمكن لأي نظام حاسوبي التعامل معه؛ لذلك تقرِّر أنظمة التصفية سريعًا أي البيانات سيُحتفَظ بها وأيها سيُستبعَد. وحتى الآن، أغلب التصادمات المتكررة لا تتجاوز كونها تفاعلات عادية بين البروتونات بفعل القوة القوية، وما من أحد يهتم بمعظم هذه التصادمات التي تعكس العمليات الفيزيائية المعروفة، وما بها من أي شيء جديد.

تشبه تصادمات البروتونات، من بعض النواحي، تصادم الأكياس المليئة بالحبوب. فنظرًا لأن أكياس الحبوب رخوة، فإنها تضمر وتعلق معًا معظم الوقت دون أن تفعل أي شيء مهم أثناء التصادم، لكن أحيانًا عندما تصطدم أكياس الحبوب معًا، ترتطم الحبوب الفردية بعضها ببعض بقوة هائلة، قد تصل إلى حد تصادم الحبوب الفردية وانقطاع الأكياس ذاتها. في هذه الحالة، ستطير الحبوب المتصادمة بعيدًا نظرًا لصلابتها وتتصادم بطاقة موضعية كبيرة، في حين تندفع بقية الحبوب في الاتجاه نفسه الذي بدأت فيه.

وبالمثل، عندما تتصادم البروتونات داخل الحزمة بعضها ببعض، تتصادم الوحدات الثانوية الفردية، وتتسبَّب في حدث مهم، في حين يواصِل الجزء المتبقي من مكونات البروتون سيره في الاتجاه نفسه في أنبوب الحُزَم.

لكن على عكس تصادمات الحبوب التي تصطدم فيها الحبوب ببساطة وتغيِّر اتجاهها، عندما ترتطم البروتونات بعضها ببعض، تتصادم المكونات الموجودة داخلها؛ أي الكواركات والكواركات المضادة والجلوونات، وعندما يحدث ذلك، يمكن أن تتحوَّل الجسيمات الأصلية إلى طاقة أو أنواع أخرى من المادة. وبينما تقتصر التصادمات عند الطاقات المنخفضة على الكواركات الثلاثة الحاملة لشحنة البروتون، تؤدي الآثار الافتراضية لميكانيكا الكم عند الطاقات العالية إلى تكوين محتوى كبير من الجلوونات والكواركات المضادة، مثلما شاهدنا من قبلُ في الفصل السادس. والتصادمات المثيرة للاهتمام هي التي يصطدم فيها أيٌّ من هذه المكونات الثانوية للبروتونات معًا.

وعندما تكون طاقة البروتونات عاليةً، ينطبق الأمر ذاته على الكواركات والكواركات المضادة والجلوونات الموجودة داخلها، لكن هذه الطاقة لا تساوي أبدًا الطاقة الكاملة للبروتونات؛ فهي بوجه عام جزء بسيط من الطاقة الكلية لها فحسب. عادةً، تتصادم الكواركات والجلوونات بقدر ضئيل للغاية من طاقة البروتون لإنتاج جسيمات ثقيلة. وربما بسبب قوة التفاعل الأضعف أو الكتلة الأثقل المتوقَّعة للجسيمات الجديدة، تحدث التفاعلات المهمة التي تتضمن القوى أو الجسيمات التي لم تسبق رؤيتها من قبلُ بمعدل أقل بكثير من تصادمات النموذج القياسي «الاعتيادية».

لذا، فإن معظم التصادمات — شأنها شأن تصادمات أكياس الحبوب — غير مهمة؛ فهي تتضمن إما بروتونات لا تتصادم، أو بروتونات تتصادم فتنتج أحداث «النموذج القياسي» التي نعرف بالفعل أنها موجودة بالتأكيد ولن تفيدنا بقدر كبير من المعلومات.

على الجانب الآخَر، توضِّح لنا التنبؤات أن احتمال إنتاج مصادم الهادرونات الكبير لجسيم جديد مهم، مثل بوزون هيجز، يبلغ نحو واحد في المليار.

نستنتج من ذلك أنه في لحظات نادرة فقط سيحالفنا الحظ ويحدث أمر مهم؛ لهذا نحن بحاجة إلى الكثير من التصادمات في المقام الأول. فمعظم الأحداث لن تمثِّل شيئًا جديدًا، لكن عددًا قليلًا فقط من الأحداث النادرة يمكن أن يكون مميزًا ومفيدًا للغاية.

وأدوات «التصفية» — أي الأجهزة والبرامج المُصمَّمة للتعرف على الأحداث التي من المحتمل أن تكون مهمة — هي التي تستكشف هذه الأحداث النادرة والمميَّزة. ولكي تتصور مدى ضخامة هذه المهمة (عند الوضع في الاعتبار القنوات المختلفة المحتملة)، تخيَّلْ أن لديك كاميرا بدقة ١٥٠ ميجابكسل (يشير هذا العدد إلى كمية البيانات الصادرة عن كل مجموعةٍ تمُرُّ)، وبإمكان هذه الكاميرا التقاط الصور بمعدل ٤٠ مليون صورة كل ثانية (معدل مرور المجموعات). يساوي ذلك نحو مليار حدث فيزيائي في الثانية، وذلك على افتراض وقوع ما بين ٢٠ و٢٥ حدث عند مرور كل مجموعة. وأداة التصفية هي المسئولة عن الاحتفاظ ببعض الصور المهمة فقط. يمكنك كذلك التفكير في أدوات التصفية كفلاتر للرسائل غير المرغوب فيها؛ إذ تتمثَّل وظيفتها في التأكُّد من وصول البيانات المهمة فقط لأجهزة الكمبيوتر الخاصة بالفيزيائيين التجريبيين.

تتمثَّل مهمة أدوات التصفية في التعرُّف على التصادمات التي من المحتمل أن تكون مهمة، واستبعاد تلك التي لا تنطوي على أي شيء جديد. والأحداث نفسها — التي تترك نقطة التفاعل وتُسجَّل في الكواشف — لا بد أن تتميز بشكل واضح عن عمليات النموذج القياسي المعتادة. ومعرفة متى تبدو الأحداث مهمة توضِّح لنا أي الأحداث علينا الاحتفاظ بها. يقلل ذلك من معدل الأحداث الجديدة القابلة للتعرُّف عليها بالفعل. إن مهمة أدوات التصفية جسيمة بحق؛ فهي المسئولة عن غربلة مليار حدث في الثانية إلى بضع مئات من الأحداث قد تكون ذات أهمية.

وتحقِّق مجموعة من «بوابات» البرامج والأجهزة هذه المهمة. فيستبعد كل مستوًى متتالٍ من التصفية معظم الأحداث التي يتلقَّاها باعتبارها غير مهمة، تاركًا كمية من البيانات القابلة للتعامل معها بشكل أكبر. وهذه البيانات بدورها تخضع للتحليل بواسطة أنظمة الكمبيوتر في ١٦٠ مؤسسة أكاديمية حول العالم.

أداة تصفية المستوى الأول هي أداة مستندة إلى جهاز — أي مدمجة في الكواشف — وتؤدِّي عملًا جيدًا في ملاحظة الخصائص المميزة، مثل تحديد الأحداث التي تتضمن

ميوونات عالية الطاقة أو رواسب طاقة عرضية كبيرة في المِسعَرات. وأثناء انتظار نتيجة أداة تصفية المستوى الأول مدة بضع ميكروثوانٍ، تُحتجَز البيانات الصادرة عن كل مجموعة تمرُّ بالمصادم، أما أدوات تصفية المستويات الأعلى، فتستند إلى البرامج. وتعمل خوارزميات الاختيار على مجموعة كبيرة من أجهزة الكمبيوتر بالقرب من الكاشف. وأداة تصفية المستوى الأول تخفض عدد الأحداث البالغ مليار حدث في الثانية إلى نحو ١٠٠ ألف حدث في الثانية، وهي الأحداث التي تعمل أدوات التصفية المستندة إلى البرامج بعد ذلك على تخفيضها من آلاف إلى بضعة مئات فقط.

وكل حدث يمر بأداة تصفية يحمل قدرًا هائلًا من المعلومات يفوق الواحد ميجابايت، وهي القراءات التي أصدرتها عناصر الكاشف التي تحدَّثْنا عنها فيما سبق. ومع بضع مئات من الأحداث كل ثانية، تشغل التجارب ما يزيد عن ١٠٠ ميجابايت من مساحة محرك أقراص الكمبيوتر في الثانية؛ أي ما يزيد عن واحد بيتابايت، وهو ما يعادل $١٠^{١٥}$ بايت، أو واحد كوادريليون بايت (كم من المرات يمكنك أن تستخدم هذا المصطلح؟) وهو ما يساوي مقدار المعلومات التي تشغلها مئات الآلاف من أقراص الفيديو المدمجة سنويًّا.

ابتكَرَ تيم بيرنرز لي الشبكة العنكبوتية العالمية بهدف معالجة بيانات سيرن، والسماح للفيزيائيين التجريبيين في جميع أنحاء العالم بتبادُل المعلومات باستخدام جهاز كمبيوتر واحد في نفس الوقت. وتُعَدُّ شبكة حوسبة مصادم الهادرونات الكبير التطور الحاسوبي الرئيسي التالي لمنظمة سيرن. دُشِّن العمل بهذه الشبكة في أواخر عام ٢٠٠٨ — بعد تطوير مكثَّف لبرامج الكمبيوتر — للمساعدة في التعامل مع الكميات الهائلة من البيانات التي ينوي الفيزيائيون التجريبيون معالجتها. وتستخدم هذه الشبكة كابلات ألياف بصرية خاصة، ونسبًا عالية السرعة من الإنترنت العام. وترجع تسميتها بالشبكة إلى أن البيانات التي تتناولها لا ترتبط بمكان واحد فقط، وإنما تُوزَّع على أجهزة كمبيوتر تنتشر بجميع أنحاء العالم، وهي تشبه في ذلك الكهرباء في أي منطقة حضرية؛ حيث لا ترتبط بمحطة توليد واحدة فقط.

وبمجرد أن تُخزَّن الأحداث التي تتوصَّل إليها أدوات التصفية، توزَّع عبر هذه الشبكة بجميع أنحاء العالم. وبفضل هذه الشبكة، يكون لدى شبكات الكمبيوتر بجميع بقاع الأرض إمكانيةٌ للوصول إلى البيانات المخزَّنة الوفيرة. وفي حين تنشر شبكة الإنترنت المعلومات، تنشر شبكة حوسبة المصادم القوة الحاسوبية وتخزين البيانات بين الكثير من أجهزة الكمبيوتر المشاركة فيها.

تستخدم مراكز الحوسبة — المنظمة في هيئة صفوف متتالية — شبكةَ حوسبة المصادم لمعالجة البيانات. الصف صفر في هذه المراكز هو المِرفق المركزي للمنظمة الأوروبية للأبحاث النووية؛ حيث تُسجَّل البيانات وتُعاد معالجتها من صورتها الأولية إلى صورة أكثر ملاءمة للتحليلات الفيزيائية. وترسل الاتصالاتُ العالية النطاق الترددي البياناتِ إلى العشرات من مراكز الحوسبة الإقليمية الكبيرة التي تشكِّل الصف الأول من هذه المراكز، ويمكن لمجموعات التحليل الوصول إلى هذه البيانات إن أرادَتْ؛ ومن ثَمَّ تصل كابلات الألياف البصرية الصفَّ الأول بمراكز التحليل البالغ عددها خمسين مركزًا، مشكِّلةً بذلك الصف الثاني من هذه المراكز. وتوجد هذه المراكز الخاصة بالتحليل في الجامعات التي تتمتع بالقدر الكافي من القوة الحاسوبية اللازمة لمحاكاة العمليات الفيزيائية وإجراء بعض التحاليل المعينة. وأخيرًا، فإن أي مجموعة جامعية يمكنها إجراء تحاليل الصف الثالث؛ حيث يتم استخلاص معظم المعلومات الفيزيائية الحقيقية في النهاية.

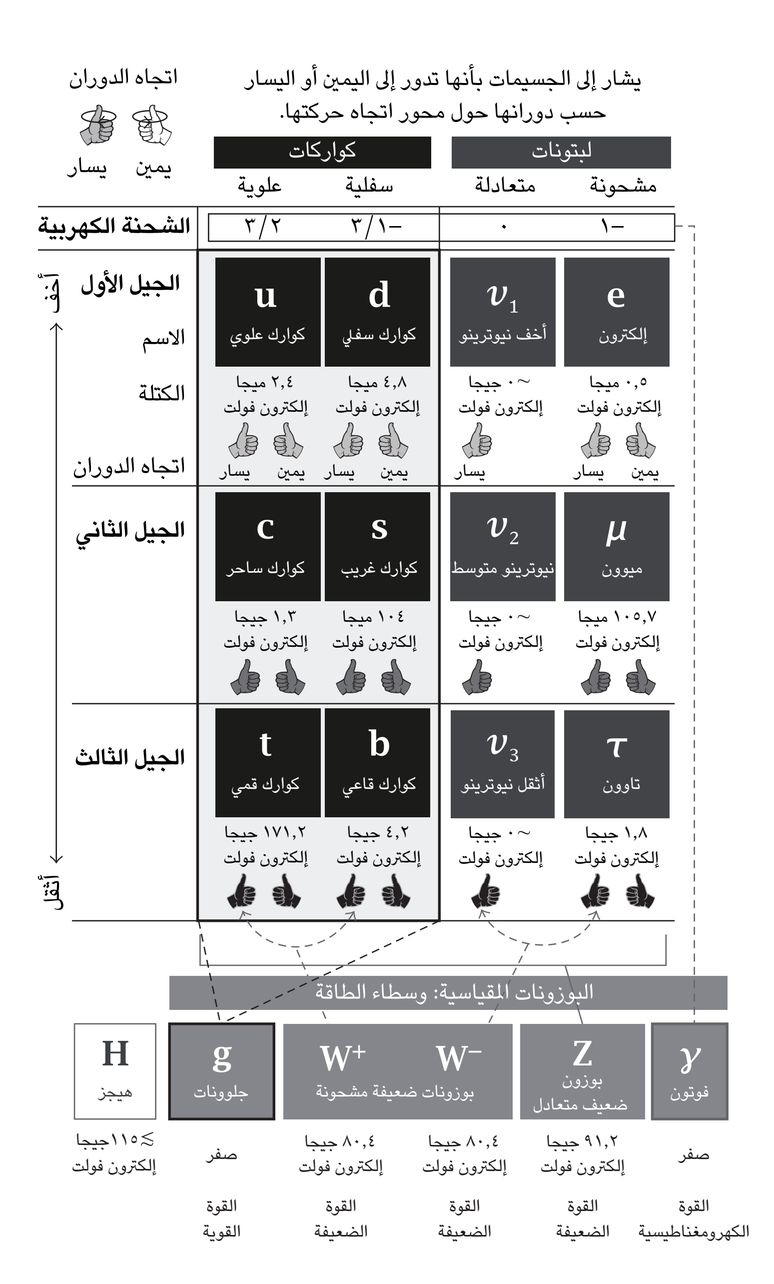
بالوصول إلى هذه المرحلة، يمكن أن يتفقَّدَ الفيزيائيون التجريبيون ما لديهم من بيانات للوصول إلى ما قد تكشف عنه تصادمات البروتونات العالية الطاقة، وهو ما يمكن أن يكون شيئًا جديدًا ومثيرًا، لكن للتأكُّد ممَّا إذا كان كذلك بالفعل أم لا، تكون المهمة الأولى للتجارب — التي سنستعرضها بمزيد من التفصيل في الفصل التالي — هي استنتاج ما كان موجودًا وتسبَّبَ في هذه النتائج.

الفصل الرابع عشر

التعرُّف على الجسيمات

يقدِّم النموذج القياسي لفيزياء الجسيمات تصنيفًا موجزًا لفهمنا الحالي للجسيمات الأولية وما بينها من تفاعلات (يوضِّح الشكل ١٤-١ ملخصًا لذلك).[1] يشتمل هذا النموذج على جسيمات مثل الكواركات العلوية والسفلية، والإلكترونات، هذه الجسيمات التي توجد في قلب المادة التي نعرفها، كما يضم في الوقت نفسه عددًا من الجسيمات الأخرى الأثقل وزنًا التي تتفاعل بواسطة القوى ذاتها، لكن لا يشيع وجودها في الطبيعة؛ وهي الجسيمات التي لا يمكننا دراستها بعناية إلا في تجارب المصادمات العالية الطاقة. ومعظم مكونات النموذج القياسي، مثل الجسيمات التي يدرسها حاليًّا مصادم الهادرونات الكبير، كانت مجهولةً تمامًا إلى أن كشفت عنها الدراسات النظرية والتجريبية المتميزة في النصف الثاني من القرن العشرين.

ولقد صُمِّمت تجربتا أطلس واللولب المركب للميوونات في مصادم الهادرونات الكبير بهدف الكشف عن جسيمات النموذج القياسي والتعرُّف عليها. والهدف الحقيقي، بالطبع، هو تجاوُز حدود معرفتنا الحالية والعثور على مكونات أو قوًى جديدة ترتبط بأهم الألغاز التي نواجِهها، لكن لفعل ذلك ينبغي أن يكون الفيزيائيون قادرين على تمييز الأحداث الخلفية بالنموذج القياسي، والتعرُّف على جسيمات هذا النموذج التي قد تتحلل أي جسيمات غريبة جديدة إليها. ويتشابه الفيزيائيون التجريبيون في مصادم الهادرونات الكبير في هذه الناحية مع المحققين الذين يحلِّلون البيانات بهدف ربط الأدلة معًا والتيقُّن مما هو موجود بالفعل. ولا يمكنهم استنتاج وجود أي شيء جديد إلا بعد استبعادهم كلَّ ما هو مألوف.



شكل ١٤-١: يستعرض هذا الشكل عناصر النموذج القياسي لفيزياء الجسيمات مع توضيح الكتل. ويشير الشكل كذلك إلى الجسيمات التي تدور يسارًا وتلك التي تدور يمينًا. والقوة الضعيفة التي تغيِّر نوع الجسيم لا تؤثِّر إلا على الجسيمات التي تدور يسارًا.

بعد استعراضنا تجربتَي المصادم ذواتَي الأهداف العامة، سوف نتناولهما مجدَّدًا في هذا الفصل لفهم كيفية تعرُّف الفيزيائيين العاملين في مصادم الهادرونات الكبير على الجسيمات الفردية على نحوٍ أفضلَ؛ فمزيد من المعرفة بالوضع الحالي لفيزياء الجسيمات وكيفية العثور على جسيمات النموذج القياسي، يمكن أن يساعدنا في مناقشة إمكانات الاكتشاف التي يتمتَّع بها مصادم الهادرونات الكبير في الجزء الرابع من هذا الكتاب.

البحث عن اللبتونات

يقسِّم فيزيائيو الجسيمات جسيمات المادة الأولية بالنموذج القياسي إلى فئتين؛ الفئة الأولى تُعرَف باسم اللبتونات، وتتضمن جسيمات لا تتأثَّر بالقوة النووية القوية، مثل الإلكترونات. ويشتمل النموذج القياسي أيضًا على نوعين أثقل من الإلكترون يحملان الشحنة ذاتها، لكن كتلتيهما أكبر، واسميهما «الميوون» و«التاوون». وقد ثبت أن كل جسيم من جسيمات المادة بالنموذج القياسي له ثلاث صور تحمل جميعها الشحنة ذاتها، لكن كل «جيل» من هذه الجسيمات يكون أثقل وزنًا من الجيل التالي له. ونحن لا نعلم السبب وراء وجود هذه الصور الثلاث من الجسيمات التي تحمل جميعها الشحنة ذاتها. عبَّر الفيزيائي الحائز على جائزة نوبل، إيزيدور إسحاق رابي، عن حيرته عند سماعه بوجود الميوون، قائلًا عبارته الشهيرة: «مَن الذي طلب هذا؟»

واللبتونات الأخف وزنًا هي الأيسر في العثور عليها؛ فرغم أن كلًّا من الإلكترونات والفوتونات يرسبان الطاقةَ في المِسعَر الكهرومغناطيسي، يمكن تمييز الإلكترون بسهولة عن الفوتون؛ لأن الإلكترون يحمل شحنةً بينما الفوتون متعادل؛ ومن ثَمَّ يكون الإلكترون هو الوحيد الذي يخلِّف أثرًا في الكاشف الداخلي قبل ترسيب الطاقة في المِسعَر الكهرومغناطيسي.

الميوونات أيضًا يمكن التعرُّف عليها على نحو مباشر نسبيًّا. فشأنها شأن جميع جسيمات النموذج القياسي الأخرى الأثقل وزنًا، تتحلَّل الميوونات على نحو سريع للغاية يَحُول دون العثور عليها في المادة العادية؛ لذلك قلَّمَا نعثر عليها على سطح الأرض. لكن عمر الميوونات طويل بما يكفي لانتقالها إلى الحدود الخارجية للكواشف قبل تحلُّلها؛ ومن ثَمَّ فهي تترك آثارًا لمسارات طويلة واضحة تسمح للفيزيائيين التجريبيين بتتَبُّعها بين الكاشف الداخلي وحجرات الميوونات الخارجية. وبما أن الميوون هو جسيم النموذج

القياسي الوحيد الذي يمكنه أن يصل إلى الكواشف الخارجية هذه ويخلِّف علامةً مرئية، فمن اليسير العثور عليه.

أما التاوونات، فالعثور عليها ليس بهذا القدر من السهولة، رغم أنها مرئية؛ فالتاوون من اللبتونات، ويحمل شحنة مثل الإلكترون والميوون، لكنه أثقل وزنًا، وهو ليس مستقرًّا، شأنه شأن معظم الجسيمات الثقيلة. معنى ذلك أنه يتحلَّل مُخلِّفًا وراءه جسيمات أخرى، فيتحلل التاوون سريعًا إلى لبتون مشحون أخف وزنًا وجسيمين يسميان النيوترينوات، أو يتحلَّل إلى نيوترينو واحد وجسيم يسمَّى البايون، وهو الجسيم الذي يتأثَّر بالقوة القوية. يدرس الفيزيائيون التجريبيون النواتج التي يُسفِر عنها تحلُّل الجسيم الأولي للكشف عمَّا إذا كان جسيم ثقيل متحلِّل هو المسئول عن وجودها أم لا. وإذا كان هذا هو الحال، يحدِّدون خصائص هذا الجسيم. لذا، بالرغم من أن التاوون لا يخلِّف أثرًا مباشرًا، فجميع المعلومات التي يسجِّلها الفيزيائيون التجريبيون عن نواتج التحلل تساعد في التعرُّف على هذا التاوون وخصائصه.

يحمل الإلكترون والميوون، بل لبتون التاوون الأثقل وزنًا أيضًا، الشحنةَ −١؛ أي الشحنة المضادة للبروتون ذي الشحنة الموجبة. تنتج المصادمات أيضًا الجسيمات المضادة المرتبطة بهذه اللبتونات المشحونة، وهي البوزيترون، والميوون المضاد، والتاوون المضاد. هذه الجسيمات المضادة تحمل الشحنة +١، وتخلف آثارًا مشابهة في الكواشف. لكن نظرًا لشحناتها المضادة، تنحني هذه الجسيمات في الاتجاه المضاد في وجود مجال مغناطيسي.

بالإضافة إلى الأنواع الثلاثة من اللبتونات المشحونة التي وصفناها للتو، يتضمن النموذج القياسي كذلك النيوترينوات، وهي لبتونات لا تحمل أي شحنة كهربية على الإطلاق. ففي حين تخضع اللبتونات الثلاثة المشحونة لتأثير كلٍّ من القوة الكهرومغناطيسية والقوة النووية الضعيفة، لا تحمل النيوترينوات أي شحنة؛ ومن ثَمَّ فهي منيعة على القوة الكهربية. وكانت نتائج التجارب حتى تسعينيات القرن العشرين تشير إلى أن النيوترينوات عديمة الكتلة، لكن من أهم الاكتشافات التي شهدها ذلك العقد هو اكتشاف أن النيوترينوات لها كتلة متناهية الصغر، وغير مضمَحِلَّة في الوقت نفسه، الأمر الذي منحنا معلومات مهمة عن بنية النموذج القياسي.

ومع أن النيوترينواتِ خفيفةُ الوزن للغاية، الأمر الذي يجعلها تقع في نطاق قدرة طاقة المصادمات، من المستحيل اكتشافها مباشَرةً في مصادم الهادرونات الكبير لأنها لا تحمل أي شحنة كهربية؛ ومن ثَمَّ لا تتفاعل إلا بصورة ضعيفة للغاية. وتصل درجة

ضعفها إلى أنه بالرغم من مرور أكثر من ٥٠ تريليون نيوترينو قادم من الشمس عبر جسدك كل ثانية، فإنك لا تدرك ذلك حتى يخبرك أحد به.

بالرغم من كون النيوترينوات غير مرئية، حزر الفيزيائي فولفجانج باولي وجودها في محاولة يائسة منه للخروج من مأزق تفسير: إلى أين ذهبت الطاقة عند تحلل النيوترونات. فدون وجود النيوترينو الذي يحمل جزءًا من الطاقة، بدا الأمر كأنَّ هذه العملية تنتهك مبدأ حفظ الطاقة؛ وذلك لأن البروتون والإلكترون اللذين تَمَّ اكتشافهما بعد التحلُّل لم يصل مجموع طاقتهما إلى طاقة النيوترون الذي تحلَّلَ. حتى كبار الفيزيائيين، مثل نيلز بور، كانوا على استعداد آنذاك للتخلِّي عن مبادئهم وقبول فكرة فقدان الطاقة، لكن باولي كان أكثر إخلاصًا للأسس الفيزيائية، فافترض أن الطاقة لم تُفقَد، وأن كل ما في الأمر أن الفيزيائيين التجريبيين وقتها لم يتمكَّنُوا فحسب من رؤية الجسيم ذي الشحنة المتعادلة الذي حمَلَ ما تبقَّى من هذه الطاقة. وثبتَتْ بعد ذلك صحةُ هذا الافتراض.

أطلَقَ باولي على الجسيم — الافتراضي آنذاك — اسم النيوترون، لكن الاسم استُخدِم بعد ذلك لأغراض أخرى؛ ألَا وهي وصف الشريك المتعادل الشحنة للبروتون الموجود داخل النواة؛ ومن ثَمَّ أطلق إنريكو فيرمي — وهو فيزيائي إيطالي وضع نظرية التفاعلات الضعيفة، لكنه يشتهر على الأرجح بمساعدته في تطوير أول مفاعل نووي — على هذا الجسيم الاسم اللطيف «نيوترينو»، الذي يعني بالإيطالية «النيوترون الصغير». وهو بالطبع ليس نيوترونًا صغيرًا، لكنه — مثل النيوترون — عديم الشحنة الكهربية، كما أن النيوترينو أخف وزنًا بكثير من النيوترون.

وكما هو الحال مع جميع الأنواع الأخرى من جسيمات النموذج القياسي، يوجد ثلاثة أنواع من النيوترينوات. فكل لبتون مشحون (الإلكترون والميوون والتاوون) يرتبط به نيوترينو يتفاعل معه بواسطة القوة النووية الضعيفة.[2]

لقد اطلعنا فيما سبق على كيفية العثور على الإلكترونات والميوونات والتاوونات؛ لذا فإن السؤال المتبقِّي بشأن اللبتونات هو: كيف يعثر الفيزيائيون التجريبيون على النيوترينوات؟ فنظرًا لأن النيوترينوات لا تحمل أي شحنة كهربية، وتتفاعل بصورة ضعيفة للغاية، فإنها تهرب من الكاشف دون أن تخلِّف أي أثر يدل عليها على الإطلاق؛ فكيف يمكن لأي شخص في مصادم الهادرونات الكبير إثبات وجودها؟

تكمن الإجابة هنا في الزخم (الذي يساوي السرعة مضروبة في الكتلة عند تحرك الجسيمات ببطء، لكن شأنه شأن الطاقة يسير في اتجاه معين عند تحرُّك الجسيم بسرعة

تقارِب سرعة الضوء)، والزخم محفوظ في جميع الاتجاهات. وكما هو الحال مع الطاقة، لم نتوصَّل مطلقًا إلى أي دليل على أن الزخم يمكن فقدانه؛ ومن ثَمَّ إذا كان زخم الجسيمات المقيسة في الكاشف أقل من الزخم الذي دخل إليه، فمعنى ذلك أن جسيمًا (أو عددًا من الجسيمات) قد هرب حاملًا معه الزخم المفقود في العملية. هذا المنطق دفع باولي إلى استنتاج وجود النيوترينوات في المقام الأول (في تحلُّل بيتا النووي)، ونحن نستند إلى هذا المنطق حتى يومنا هذا في معرفتنا بوجود الجسيمات الضعيفة التفاعل التي يبدو أنها غير مرئية.

ويقيس الفيزيائيون التجريبيون في مصادمات الهادرونات الزخم الكامل المستعرض للحزمة، ويحسبون ما إذا كان هناك شيء مفقود أم لا. ويرجع السبب في تركيزهم على الزخم المستعرض للحزمة إلى أن قدرًا كبيرًا من هذا الزخم يُحمَل بعيدًا بواسطة الجسيمات التي تتجه إلى أسفل أنبوب الحُزَم؛ ومن ثَمَّ يصعب للغاية تعقُّبها. لكن الزخم العمودي على البروتونات الأولية أيسر كثيرًا في قياسه وحسابه.

وبما أن إجمالي الزخم المستعرض للحزمة في التصادم الأولي يبلغ صفرًا، ينبغي أن تكون هذه قيمته في الحالة النهائية أيضًا؛ ومن ثَمَّ إذا لم تتَّفِق القياسات مع التوقعات، يمكن للفيزيائيين التجريبيين «اكتشاف» فقدان شيء ما. السؤال الوحيد المتبقي هو: كيف نميِّز هذا الشيء من بين العديد من الجسيمات غير المتفاعلة المحتملة؟ في عمليات النموذج القياسي، نعلم أن النيوترينوات ستكون من بين العناصر التي لم يتم الكشف عنها، وبناءً على تفاعلات القوة الضعيفة المعروفة للنيوترينو التي سنتناولها فيما بعدُ، يحسب الفيزيائيون ويتوقَّعون المعدل الذي من المفترض أن تُنتَج به النيوترينوات. بالإضافة إلى ذلك، فإن الفيزيائيين يعرفون بالفعل خصائص تحلُّل بوزون W. على سبيل المثال، الميوون أو الإلكترون المعزول، الذي يحمل زخمه المستعرض طاقةً مشابِهةً لنصف كتلة بوزون W، فريد للغاية؛ ومن ثَمَّ عن طريق استخدام مبدأ حفظ الزخم والمدخلات النظرية، يمكن «العثور» على النيوترينوات. من الجلي هنا أن الملامح المميزة لهذه الجسيمات أقل بكثير من تلك التي نراها مباشَرةً، ولا يمكننا الجزم بوجودها إلا من خلال مزيج من الاعتبارات النظرية وقياسات الطاقة المفقودة.

من الأهمية بمكان وَضْع هذه الأفكار في الاعتبار عند تفكيرنا في الاكتشافات الحديثة. فثمة اعتبارات مماثِلة تنطبق على الجسيمات الأخرى الحديثة التي لا تحمل أي شحنات، أو تحمل شحنات ضعيفة للغاية، فلا يمكن اكتشافها مباشَرةً. في هذه الحالات، لا يمكن

استنتاج ما هو موجود إلا باستخدام مزيج من المدخلات النظرية والطاقة المفقودة، وهذا هو السبب وراء الأهمية الكبيرة لخاصية «إحكام السد»؛ أي الكشف عن أكبر قدر ممكن من الزخم.

البحث عن الهادرونات

استعرضنا إلى الآن اللبتونات (وهي الإلكترونات، والميوونات، والتاوونات، وما يرتبط بها من نيوترينوات)، وبذلك تكون فئة الجسيمات المتبقية في النموذج القياسي هي الهادرونات. والهادرونات جسيمات تتفاعل بواسطة القوة النووية القوية، وتشمل هذه الفئة جميع الجسيمات المكونة من كواركات وجلوونات، مثل البروتونات والنيوترونات وجسيمات أخرى تُعرَف باسم الباريونات. وللهادرونات بنية داخلية تتمثَّل في علاقات الترابط بين الكواركات والجلوونات المرتبطة بعضها ببعض بفعل القوة النووية القوية.

لكن النموذج القياسي لا يعرض حالات الترابط الكثيرة المحتملة فيه، وإنما يتضمن الجسيمات الجوهرية التي ترتبط بعضها ببعض في حالات هادرونية؛ أَلَا وهي الكواركات والجلوونات. فبالإضافة إلى الكواركات العلوية والسفلية التي توجد داخل البروتونات والنيوترونات، توجد كذلك كواركات أثقل وزنًا تُعرَف باسم الكواركات الساحرة، والكواركات الغريبة، والكواركات القمية، والكواركات القاعية. وكما هو الحال مع اللبتونات المشحونة والمتعادلة الشحنة، تحمل الكواركات الأثقل وزنًا شحناتٍ متطابقةً مع شحناتِ مثيلاتها الأخف وزنًا؛ أي الكواركات العلوية والسفلية. لا توجد الكواركات الأثقل وزنًا من تلقاء نفسها في الطبيعة؛ ومن ثَمَّ نحتاج المصادمات لدراستها.

تبدو الهادرونات (التي تتفاعل بواسطة القوة القوية) مختلفة تمامًا عن اللبتونات (التي لا تفعل ذلك) في مصادمات الجسيمات، ويرجع السبب الرئيسي في ذلك إلى أن تفاعلات الكواركات والجلوونات قوية لدرجة تَحُول دون ظهورها منفصلة أبدًا؛ فهي توجد دومًا وسط دفق قد يحتوي على الجسيم الأصلي، لكنه يشتمل على مجموعة من الجسيمات الأخرى التي تخضع للقوة القوية أيضًا. والتدفقات لا تحتوي على جسيمات فردية، وإنما رذاذ من الجسيمات المتفاعلة بواسطة القوة القوية التي «تحمي» الجسيم الأولي، كما هو واضح في الشكل ١٤-٢. وحتى إن لم توجد التفاعلات القوية في الحدث الأولي، فإنها ستؤدي إلى إنتاج العديد من الكواركات والجلوونات الجديدة من الكوارك أو الجلوون الذي بدأ الرذاذ من البداية. وتنتج مصادمات البروتونات الكثير من التدفقات

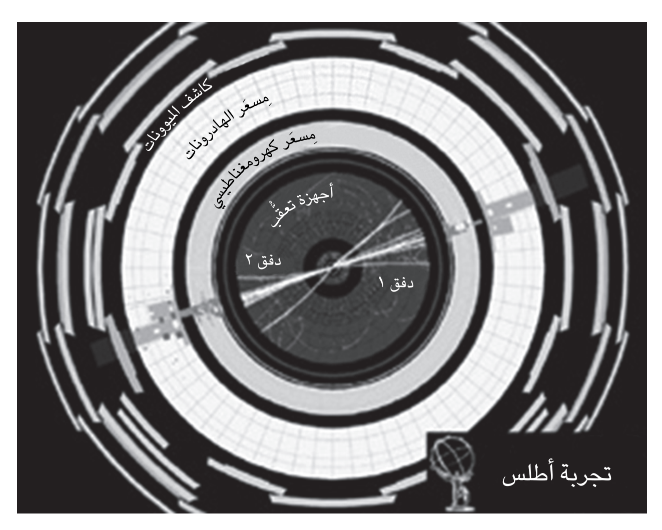
نظرًا لأن البروتونات نفسها مكوَّنة من جسيمات متفاعلة بقوة، وهذه الجسيمات تنتج رذاذًا يتكوَّن من الكثير من الجسيمات الأخرى المتفاعِلة بواسطة القوة القوية التي تتحرك معها، كما أنها تُنتِج أحيانًا كواركات وجلوونات تصدر في اتجاهات مختلفة وتشكِّل تدفقاتها المستقلة.

لذا، فإن الجزء الذي اقتبسته في كتاب «الطرق الملتوية» من «أغنية جيت» الواردة في فيلم «قصة الحي الغربي»، يصف التدفقات الهادرونية على نحو دقيق:

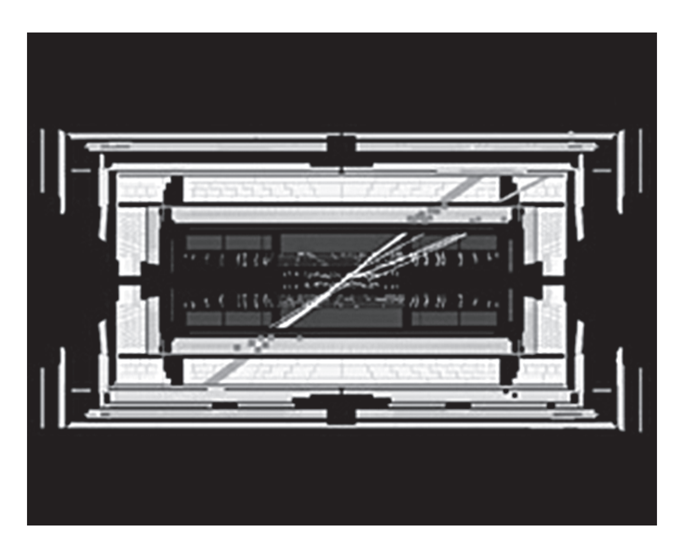
لن تشعر أبدًا بالوحدة،
لن تشعر أبدًا بالعزلة!
إنْ كنتَ وحدك بالمنزل،
وتنتظر صحبة،
فستكون آمِنًا.

لن يُعثَر على الكواركات — وأغلب أعضاء مجموعة الهادرونات — بمفردها، وإنما وسط جسيمات مرافقة متفاعلة بقوة.

وتخلِّف التدفقات بوجه عام آثارًا مرئية؛ لأن بعض الجسيمات الموجودة في هذه التدفقات مشحونة، وعند وصولها للمِسعَرات ترسب طاقتها. والدراسات التجريبية الدقيقة، إلى جانب الحسابات التحليلية وحسابات الكمبيوتر، تساعِد الفيزيائيين التجريبيين في اكتشاف خصائص الهادرونات التي أنتجت التدفقات في البداية. رغم ذلك، فإن التدفقات والتفاعلات القوية تجعل الكواركات والجلوونات أكثر صعوبةً في العثور عليها؛ فنحن لا نقيس الكوارك أو الجلوون نفسه، وإنما التدفُّق الذي يوجد بداخله الكوارك أو الجلوون؛ الأمر الذي يجعل أغلب تدفُّقات الكواركات والجلوونات لا يمكن تمييزها عن بعضها البعض، فجميعها ترسب كميات كبيرة من الطاقة وتخلِّف وراءها كثيرًا من الآثار. (انظر الشكل ١٤-٣ للاطلاع على رسم بياني تخطيطي يوضِّح كيفية تعرُّف الكواشف على جسيمات النموذج القياسي الأساسية.)

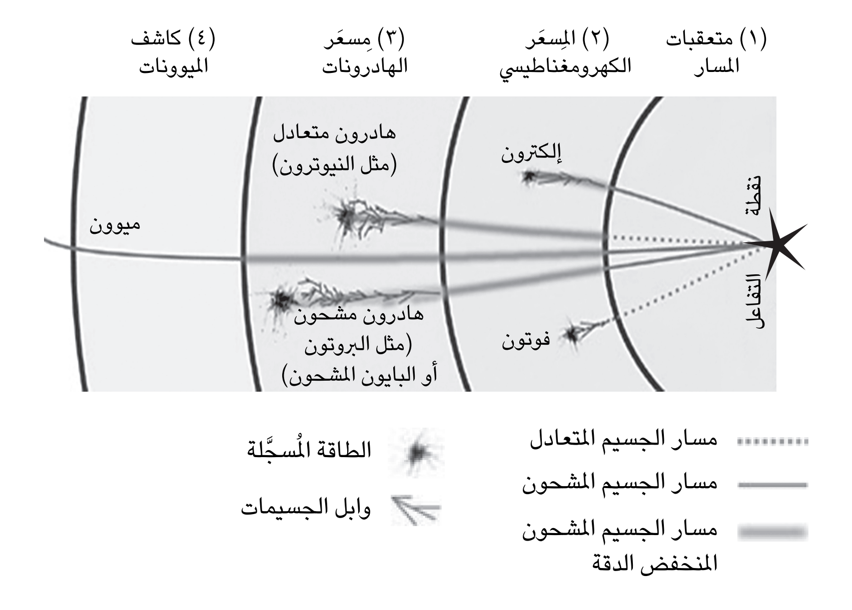


منظر من مقطع عرضي



منظر جانبي

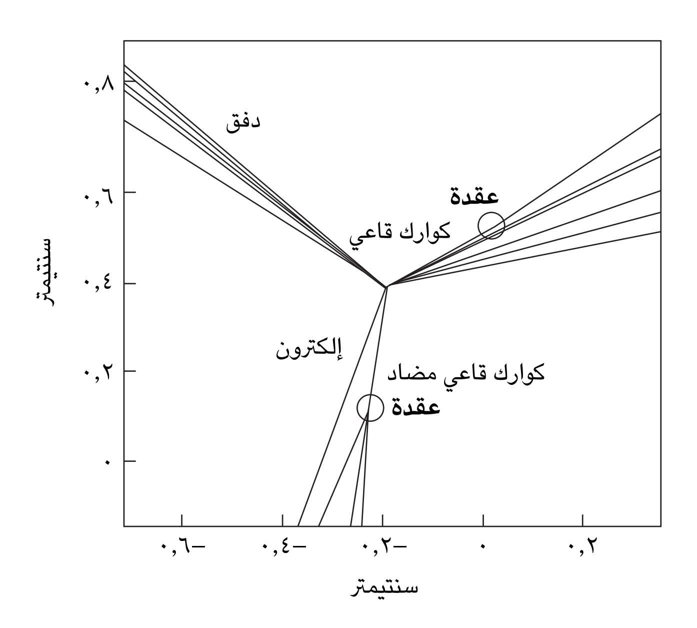
شكل ١٤-٢: الدفق هو رذاذ من الجسيمات المتفاعلة بواسطة القوة القوية يتكوَّن حول الكواركات والجلوونات. وتوضح الصورة في هذا الشكل اكتشاف هذه التدفقات في متعقبات المسار ومِسعَر الهادرونات. (نسخة مُعدَّلة من صورة مقدَّمَة من سيرن.)



شكل ١٤-٣: ملخَّص لكيفية تمييز جسيمات النموذج القياسي في الكواشف. لا تسجِّل متعقبات المسار الجسيمات المتعادلة الشحنة، أما الهادرونات المتعادلة أو المشحونة، فيمكن أن تخلِّف رواسب بسيطة في المِسعَر الكهرومغناطيسي، لكنها ترسب أغلب طاقتها في مِسعَر الهادرونات. أما الميوونات فتواصِل سيرها حتى تصل إلى الجزء الخارجي من الكاشف.

حتى بعد قياس خصائص أي دفق، من الصعب — إن لم يكن مستحيلًا — تحديد أي الكواركات أو الجلوونات المختلفة تسبب في هذا الدفق. ويُستثنَى من هذه القاعدة الكوارك القاعي الذي يُعَدُّ أثقل الكواركات ويحمل نفس شحنة الكوارك السفلي (والكوارك الغريب الثقيل الوزن أيضًا). والسبب وراء تميُّز الكوارك القاعي هو أنه يتحلَّل على نحو أبطأ من الكواركات الأخرى، فالكواركات الأخرى غير المستقرة تتحلَّل على الفور بعد إنتاجها؛ ومن ثَمَّ يبدو أن نواتج تحلُّلها تبدأ مساراتها عند نقطة التفاعل التي تصادمت عندها البروتونات. لكن الكواركات القاعية تدوم لفترة كافية (نحو بيكوثانية ونصف، أو ما يكفي للتحرك نحو نصف ملِّيمتر بسرعة الضوء التي تتحرك بها)، لتترك

أثرًا على بُعْد مسافة كبيرة للغاية من نقطة التفاعل. وتُكتشَف هذه «الذروة المُزاحَة» بواسطة الكواشف السيليكونية الداخلية، كما هو موضَّح في الشكل ١٤-٤.



شكل ١٤-٤: تدوم الهادرونات المكونة من الكواركات القاعية فترةً كافيةً لتخلِّف أثرًا مرئيًّا في الكاشف قبل تحلُّلها إلى جسيمات مشحونة أخرى. ويمكن أن يُسفِر ذلك عن تكوُّن عقدة في كواشف الذروة السيليكونية والتي يمكن استخدامها للتعرُّف على الكواركات القاعية. والعقد الموضحة هنا نتجت عن عمليات تحلل كواركات قمية.

عندما يعيد الفيزيائيون التجريبيون بناءَ مسارٍ ما من تحلُّل كوارك قاعي، فإن هذا المسار لا يعود إلى نقطة التفاعل الأولية في مركز الحدث، وإنما يبدو أنه ينشأ من المكان الذي تحلَّلَ فيه الكوارك القاعي في متعقب المسار الداخلي، مخلِّفًا وراءه «عقدة» تمثِّل الوصلة بين الكوارك القاعي الذي دخل، وناتج التحلل الذي خرج.[3] وعن طريق التقسيم الدقيق للكواشف السيليكونية، يتمكَّن الفيزيائيون التجريبيون من مشاهدة المسارات

التفصيلية في المنطقة القريبة من الحُزَم، والنجاح في التعرف على الكواركات القاعية في معظم الوقت.

النوع الآخَر المميز من الكواركات، من وجهة النظر التجريبية، هو الكوارك القمي، ويرجع سبب تميُّزه إلى أنه ثقيل للغاية، فهو الأثقل بين الكواركات الثلاثة التي تحمل نفس شحنة الكوارك العلوي (الثالث هو الكوارك الساحر). وكتلة هذا الكوارك أثقل بنحو ٤٠ مرة من الكوارك القاعي ذي الشحنة المختلفة، وأكثر بنحو ٣٠ ألف مرة من كتلة الكوارك العلوي الذي يحمل نفس شحنته.

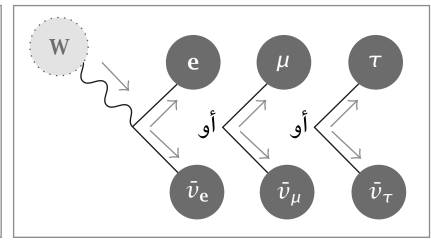
والكواركات القمية ثقيلة بما فيه الكفاية بحيث تخلِّف نواتج تحلُّلها آثارًا واضحة. فعندما تتحلل الكواركات الأخف وزنًا، تنتقل نواتج التحلل — شأنها شأن الجسيم الأولي — بسرعة تقارِب سرعة الضوء، مما يجعلها تتدافع معًا فيما يبدو دفقًا واحدًا، حتى إن كان أصل هذا الدفق يرجع إلى اثنين أو أكثر من نواتج التحلل المميزة. على الجانب الآخَر، ما لم تكن هذه الكواركات القمية عاليةَ الطاقة للغاية، فإنها تتحلَّل إلى كواركات قاعية وبوزونات W (البوزونات المقياسية الضعيفة المشحونة)، ويمكن أن يتم التعرف عليها بالعثور على كليهما. ونظرًا لأن الكتلة الثقيلة للكوارك القمي تعني أنه يتفاعل بالقرب من جسيم هيجز وغيره من الجسيمات الأخرى التي تدخل في فيزياء النطاق الضعيف التي نأمل في فهمها قريبًا، فإن خصائص هذه الكواركات القمية وتفاعلاتها قد تقدِّم لنا أدلةً قيِّمةً على النظريات الفيزيائية التي يقوم عليها النموذج القياسي.

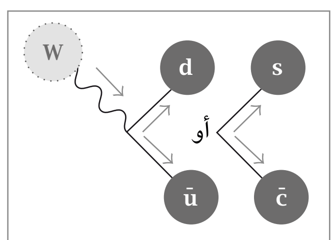
البحث عن حاملات القوى الضعيفة

قبل أن نختم مناقشتنا حول كيفية التعرُّف على جسيمات النموذج القياسي، ستكون محطتنا الأخيرة هي البوزونات المقياسية الضعيفة التي تنقل القوة النووية الضعيفة، وهي بوزونا W وبوزون Z. ولهذه البوزونات المقياسية الضعيفة سمة خاصة تتميز بها عن الفوتونات والجلوونات، وهي أن كتلتها لا تضمحِلُّ. وتفرضُ الكتل المرتبطة بهذه البوزونات — التي تنقل القوة الضعيفة — بعضَ المعضلات المهمة؛ فأصل هذه الكتل — شأنها شأن الكتل الأخرى الخاصة بالجسيمات الأولية التي تناولناها في هذا الفصل — يعود إلى آلية هيجز التي سنستعرضها بعد قليل.

نظرًا لثقل وزن بوزونَيْ W وبوزون Z، فإن هذه البوزونات تتحلل. ويعني ذلك أنه — كما هو الحال مع الكوارك القمي وغيره من الجسيمات الأخرى الثقيلة غير المستقرة — لا يمكن التعرُّف عليها إلا من خلال العثور على الجسيمات التي تنتج عن تحللها. وبما أن الجسيمات الجديدة الثقيلة تكون على الأرجح غير مستقرة بدورها، فسوف نستخدم عمليات تحلل البوزونات المقياسية الضعيفة لنضرب مثلًا على خاصية أخرى مهمة للجسيمات المتحللة.

يتفاعل بوزون W مع جميع الجسيمات التي تتأثَّر بالقوة الضعيفة (أي جميع الجسيمات التي ناقشناها فيما سبق). يمنح ذلك بوزون W العديد من خيارات التحلل؛ فيمكن أن يتحلَّلَ إلى أي لبتون مشحون (إلكترون، أو ميوون، أو تاوون) إلى جانب النيوترينو المرتبط به، ويمكن أن يتحلَّلَ إلى كوارك علوي أو سفلي، أو إلى زوج مكوَّن من كوارك ساحر وكوارك غريب، كما هو موضَّح في الشكل ١٤-٥.





شكل ١٤-٥: يمكن أن يتحلَّل بوزون W إلى لبتون مشحون وإلى النيوترينو المرتبط به، أو إلى كوارك علوي وسفلي، أو إلى كوارك ساحر وغريب. والجسيمات الفيزيائية، في الواقع، هي تراكبات لأنواع مختلفة من الكواركات أو النيوترينوات. يسمح ذلك لبوزون W بالتحلُّل أحيانًا إلى جسيمات من أجيال مختلفة على نحو متزامن.

تلعب كتل الجسيمات أيضًا دورًا مهمًّا في تحديد عمليات التحلل المسموح بها، فلا يمكن للجسيم أن يتحلَّل إلا إلى جسيمات يكون مجموع كتلتها أصغر من كتلة الجسيم الأولي.لذا، رغم أن بوزون W يتفاعل أيضًا مع الكواركات القمية والقاعية، فإن الكوارك

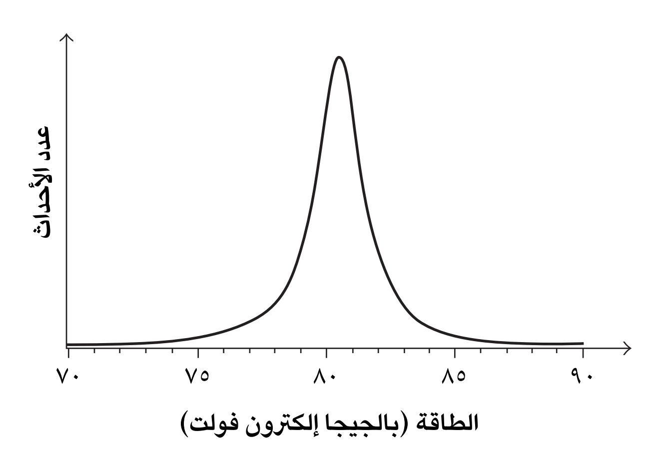
القمي أثقل من بوزون W؛ ومن ثَمَّ يستحيل أن يتحلل البوزون إليه.[4]

لنفكِّر مثلًا في تحلُّلِ بوزون W إلى اثنين من الكواركات؛ لأنه في هذه الحالة يقيس الفيزيائيون التجريبيون كلا الكواركين الناتجين عن التحلُّل (لا ينطبق ذلك على اللبتون والنيوترينو؛ لأن النيوترينو «لا يمكن رصده مباشرة». وعملًا بمبدأ حفظ الطاقة والزخم، فإن قياس إجمالي الطاقة والزخم لكلا الكواركين الناتجين سيوضِّح لنا طاقةَ الجسيم الذي تحلَّلَ إليهما بوزون W) وزخمه.

عند هذه النقطة، تضفي النسبية الخاصة لأينشتاين وميكانيكا الكم مزيدًا من الإثارة على الأمر، فتوضح لنا النسبية الخاصة كيف ترتبط الكتلة بالطاقة والزخم. ولعل كثيرًا من الناس يعرفون المعادلة $ط = ك س^{٢}$، تنطبق هذه المعادلة على الجسيمات الساكنة إذا اعتبرنا أن (ك) تساوي ($ك_{صفر}$)، وهي الكتلة الجوهرية للجسيم عندما يكون ساكنًا، لكن بمجرد أن تتحرك الجسيمات، يصير لها زخم، وتكتمل لدينا المعادلة: $ط^{٢} - ك ت^{٢} س^{٢} = ك_{صفر}^{٢} س^{٤}$.[5] من خلال هذه المعادلة، فإن الطاقة والزخم يمكِّنان الفيزيائيين التجريبيين من استنتاج كتلة الجسيم، حتى إن مرَّتْ فترة طويلة على اختفاء هذا الجسيم الأولي نتيجة لتحلله. فيجمع الفيزيائيون التجريبيون كافة قيم الزخم والطاقة، ويطبِّقون هذه المعادلة؛ ومن ثَمَّ يحدِّدون الكتلة الأولية.

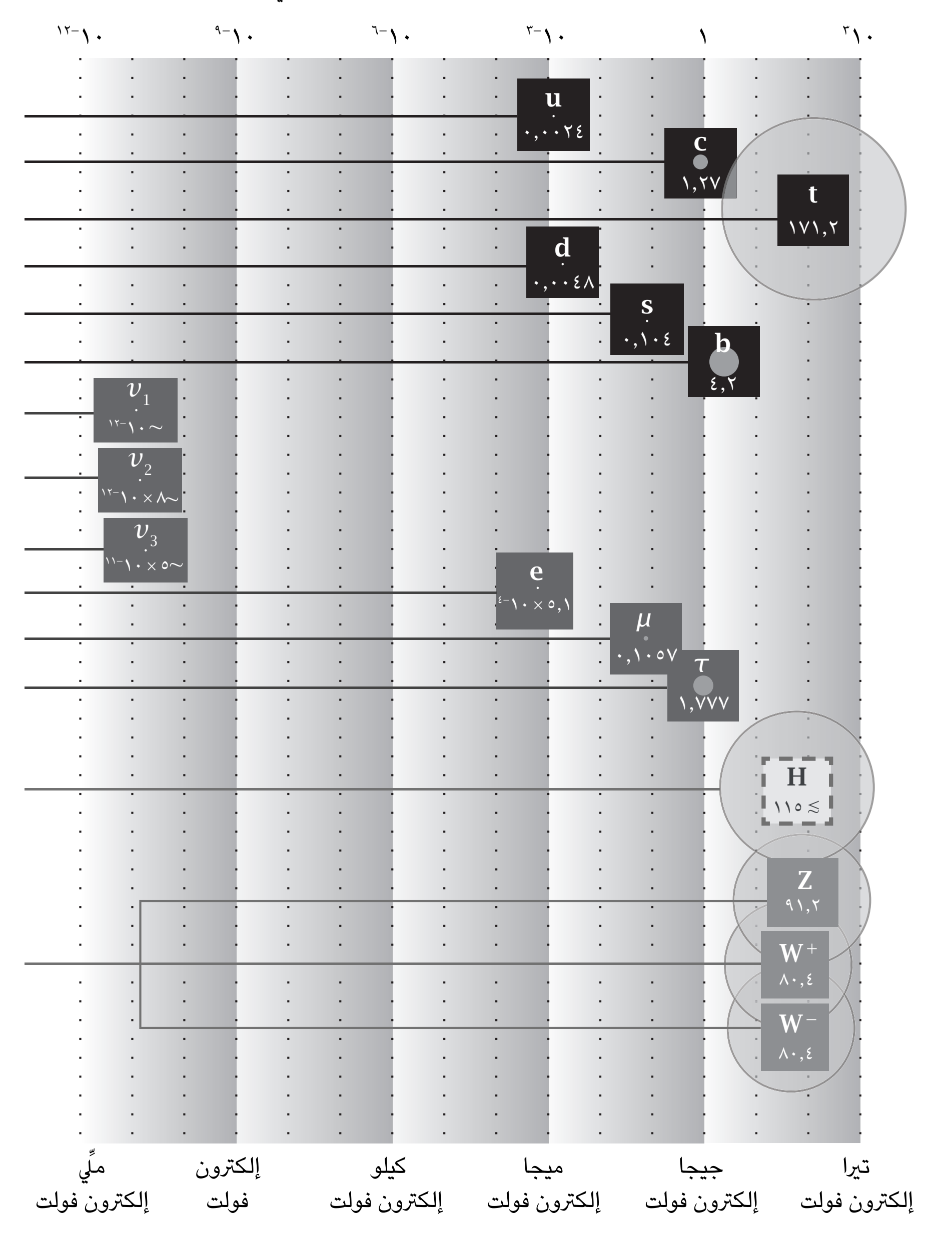
أما ميكانيكا الكم، فتلعب دورًا في هذا الأمر لأسباب أكثر تعقيدًا، فالجسيم لن يبدو دومًا أنه يحمل كتلته الحقيقة والفعلية بالضبط. ونظرًا لأن الجسيم يمكن أن يتحلَّل، فإن علاقة عدم اليقين الميكانيكية الكمية — التي تنص على أن قياس الطاقة بدقة يستغرق وقتًا لا نهائيًّا — تشير إلى أن طاقة الجسيم التي لا تستمر للأبد لا يمكن معرفتها بدقة. ويمكن أن تقل الطاقة بمقدار أكبر عندما يكون التحلُّل أسرع وزمن البقاء أقصر. يعني ذلك أنه في أي قياس محدَّد، يمكن أن تكون الكتلةُ قريبةً من متوسط القيمة الفعلية، لكنها ليست مساوية له بالضبط؛ ومن ثَمَّ لا يمكن للفيزيائيين التجريبيين استنتاج كلٍّ من الكتلة — القيمة الأكثر احتمالًا التي سيتَّفِق معها المتوسط — وزمن البقاء، إلا بإجراء الكثير من القياسات؛وذلك لأن طول الفترة الزمنية التي يظل

فيها الجسيم موجودًا قبل تحلُّله تحدِّد الانتشار في الكتل المقيسة (انظر الشكل ١٤-٦). ينطبق ذلك على بوزون W، وعلى أي جسيم متحلِّل آخَر أيضًا.

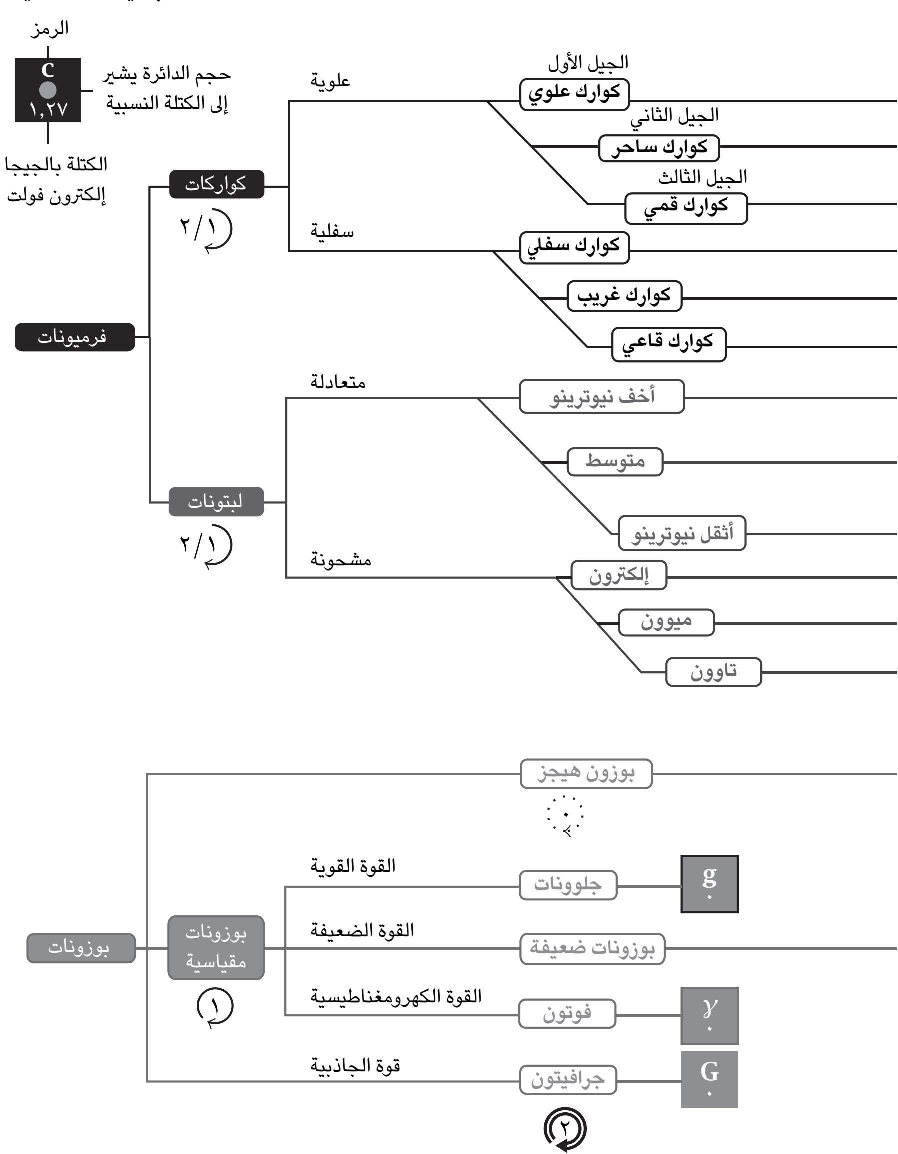


شكل ١٤-٦: تتمحور قياسات الجسيمات المتحلِّلة حول كتلها الحقيقية، لكنها تسمح بانتشار قيم الكتلة حسب زمن بقائها. ويوضِّح الشكل هذا الأمر مع بوزون W المقياسي.

عندما يجمع الفيزيائيون التجريبيون ما قاموا بقياسه، باستخدام الأساليب الموضَّحة في هذا الفصل، يمكن أن يعثروا على أحد جسيمات النموذج القياسي. (انظر الشكل ١٤-٧ للاطلاع على ملخص لجسيمات النموذج القياسي وخصائصها.)[6] لكنهم قد يتعرَّفون في النهاية أيضًا على شيء ما جديد تمامًا. وتنعقد الآمال الآن على تكوين مصادم الهادرونات الكبير لجسيمات غريبة جديدة توسِّع مداركنا بمعلومات جديدة عن الطبيعة الأساسية للمادة، بل وللفضاء أيضًا. ويتناول الجزء التالي من هذا الكتاب بعضًا من الاحتمالات الأكثر إثارةً للاهتمام في هذا الشأن.



شكل ١٤-٧: ملخص لجسيمات النموذج القياسي مرتَّبَة حسب النوع والكتلة. والدوائر الرمادية (الموجودة أحيانًا داخل المربعات) توضِّح كتل الجسيمات. يتَّضِح لنا من هذا الشكل التنوُّع الغامض لعناصر النموذج القياسي.



الجسيمات الأساسية
الرمز
C
١,٢٧
حجم الدائرة يشير
إلى الكتلة النسبية
الكتلة بالجيجا
إلكترون فولت
فرميونات
كواركات
١/٢
علوية
سفلية
الجيل الأول
كوارك علوي
الجيل الثاني
كوارك ساحر
الجيل الثالث
كوارك قمي
كوارك سفلي
كوارك غريب
كوارك قاعي
لبتونات
١/٢
متعادلة
مشحونة
أخف نيوترينو
متوسط
أثقل نيوترينو
إلكترون
ميوون
تاوون
بوزونات
بوزونات
مقياسية
١
بوزون هيجز
٠
القوة القوية
جلوونات
g
القوة الضعيفة
بوزونات ضعيفة
القوة الكهرومغناطيسية
فوتون
γ
قوة الجاذبية
جرافيتون
G
٢

الجزء الرابع

بناء النماذج والتنبُّؤ وتوقُّع النتائج

الفصل الخامس عشر

الحقيقة والجمال ومفاهيم علمية خاطئة أخرى

في فبراير ٢٠٠٧، تحدَّثَ الفيزيائي النظري الحائز على جائزة نوبل، موري جيلمان، في مؤتمر «تيد» الخاص بالنخبة بولاية كاليفورنيا، حيث يجتمع المبتكرون في العلوم والتكنولوجيا والآداب ووسائل الترفيه وغير ذلك من المجالات المهمة كل عام، لاستعراض المدارك والتطورات الحديثة في العديد من الموضوعات المختلفة. كان موضوع حديث موري — الذي نال إعجاب الجماهير واحتفوا به بالوقوف والتصفيق الحار في نهاية المؤتمر — هو الحقيقة والجمال في العلم. يمكن تلخيص الافتراض الأساسي الذي قام عليه هذا الحديث في العبارة التي قالها موري مقتبسًا كلمات الشاعر الإنجليزي جون كيتس: «الحقيقة هي الجمال، والجمال هو الحقيقة.»

كان لدى جيلمان أسباب وجيهة للإيمان بهذه العبارة العظيمة، فقد توصَّل إلى بعض أهم اكتشافاته عن الكواركات، التي أهَّلَتْه للفوز بنوبل، عن طريق البحث عن مبدأ أساسي يمكن أن ينظِّم جيدًا البيانات العشوائية في ظاهرها التي توصَّلَتْ إليها التجارب في ستينيات القرن العشرين. من واقع خبرة موري، أدَّى البحث عن الجمال — أو على الأقل البساطة — إلى الاهتداء للحقيقة أيضًا.

لم يشكِّك أيٌّ من الجماهير في ادِّعَاء موري؛ ففي نهاية الأمر، أغلب الناس يحبون فكرة أن الجمال يتماشى مع الحقيقة، وأن البحث عن أحدهما سيكشف على الأرجح عن الآخَر، لكنني أقِرُّ هنا بأنني وجدت دومًا بعض الصعوبة في تقبُّل هذا الافتراض. فرغم أن الجميع يحبون الإيمان بأن الجمال هو محور النظريات العلمية العظيمة، وأن الحقيقة

ستكون مرضية دومًا من الناحية الجمالية، فإن الجمال معيار غير موضوعي إلى حدٍّ ما؛ ومن ثَمَّ لا يمكن أن يكون عنصرًا موثوقًا به للحكم على الحقيقة.

تكمن المعضلة الأساسية في التطابق بين الحقيقة والجمال، في أن هذا التطابق ليس ثابتًا على الدوام. فإذا كان الجمال والحقيقة متكافئين، فما كان ليظهر في قاموسنا تعبير «الحقيقة القبيحة». ورغم أن هذا التعبير ليس متعلِّقًا بالعلم بوجه خاص، فإن نتائج ملاحظة العالم ليست دومًا جميلة. وقد لخَّص زميل داروين، توماس هَكسلي، هذا الأمر بدقة حين قال: «العلم هو فطرة سليمة منظمة، قضت فيها حقائق قبيحة على نظريات جميلة في أحيان كثيرة.»[1]

ما يزيد هذه المعضلة صعوبةً ضرورة أَخْذ الفيزيائيين في الاعتبار ملاحظة محيرة، وهي أن الكون وعناصره لا يتمتعان بالجمال على نحو كامل، فنحن نلاحظ العديد من الظواهر غير المنظمة وفوضى من الجسيمات التي نرغب في فهمها. في الأحوال المثالية، يودُّ الفيزيائيون التوصُّل إلى نظرية بسيطة قادرة على تفسير كل هذه الملاحظات، ولا تستخدم سوى مجموعة جاهزة من القواعد وأقل قدر ممكن من المكونات الأساسية. لكن حتى عند البحث عن نظرية بسيطة وأنيقة وموحدة — أي نظرية يمكن استخدامها للتنبؤ بنتيجة أي تجربة في فيزياء الجسيمات — فإننا نعلم أننا حتى لو وجدنا مثل هذه النظرية، فسنحتاج إلى الكثير من الخطوات الأخرى لربطها بعالمنا.

الكَوْن كيان معقَّد. وبوجه عام، لا بد من وجود مبادئ ومكونات جديدة كي نتمكَّنَ من ربط صيغة بسيطة بالعالم المحيط بها الأكثر تعقيدًا، وهذه المكونات الإضافية قد تقضي على الجمال الذي تتسم به الصيغة الأولية المقترحة، شأنها في ذلك شأن التعديلات التي تشوِّه عادةً المقترحات الأولية المثالية لمشروعات قوانين الكونجرس.

بوضع المعوقات المحتملة في الاعتبار، كيف يمكننا محاولة تجاوز حدود معرفتنا؟ كيف يمكننا محاولة تفسير الظواهر التي لم تُفسَّر بعدُ؟ يتناول هذا الفصل فكرة الجمال ودور المعايير الجمالية في العلم، فضلًا عن مميزات الاسترشاد بالجمال ومساوئه. يستعرض الفصل كذلك عملية «بناء النماذج» التي تستخدم أسلوب البناء العلمي التصاعدي، مع التركيز في الوقت نفسه على المعايير الجمالية في محاولةٍ لتخمين ما سيحدث بعد ذلك.

الجمال

جمعَتْني إحدى المحادثات مؤخرًا مع فنانٍ أشار مازحًا أثناء حديثنا إلى أن أحد أكثر الأمور مدعاةً للسخرية في العلم المعاصِر، أن الباحثين حاليًّا يعتبرون الجمال هدفًا لهم أكثر من الفنانين المعاصرين. لم يتخَلَّ الفنانون بالطبع عن المعايير الجمالية، لكنهم على الأقل يتحدثون عادةً عن الاكتشاف والابتكار عند مناقشة أعمالهم. يقدِّر العلماء هذه السمات أيضًا، لكنهم يسعون في الوقت نفسه للتوصُّل إلى النظريات الأنيقة التي يرونها عادةً أكثر إقناعًا.

لكن على الرغم من التقدير الذي يوليه العلماء للأناقة، فقد تتباين المفاهيم لديهم بشأن ما هو بسيط وجميل، فمثلما قد تختلف بشدة مع أحد جيرانك بشأن المزايا الفنية لأحد الفنانين المعاصرين مثل داميان هيرست، يختلف العلماء في إعجابهم بجوانب العلم المتباينة.

وعن نفسي، فإنني — ومَن يشابهني في التفكير من الباحثين الآخَرين — أفضِّل البحثَ عن المبادئ الأساسية التي توضِّح العلاقات بين الظواهر المرصودة المتباينة في ظاهرها. فيدرس معظم زملائي في مجال نظرية الأوتار نظرياتٍ معيَّنَةً قابلةً للحلِّ، يستخدمون فيها معادلات رياضية صعبة للتعامل مع مشكلات غير حقيقية (أي مشكلات لا ترتبط بالضرورة بأي بنية فيزيائية حقيقية)، والتي يمكن أن تنطبق لاحقًا على ظواهر فيزيائية يمكن ملاحظتها. وهناك فئة أخرى من الفيزيائيين ينصبُّ تركيزهم بالكامل على النظريات ذات الشكل الدقيق المنمق التي تؤدي إلى الكثير من التنبؤات التجريبية التي يمكنهم حسابها منهجيًّا، في حين يفضِّل آخَرون الحوسبة فقط.

إن المبادئ المثيرة للاهتمام، والرياضيات المتقدمة، وصور المحاكاة الرقمية المعقَّدَة، جميعها جوانب للفيزياء. ويقدِّر معظم العلماء هذه الجوانب كافةً، لكننا ننظم أولوياتنا وفقًا لما نجده أكثر متعةً أو لما نرى أنه سيوصلنا على الأرجح إلى التطورات العلمية. وفي الواقع، عادةً ما نختار منهجنا وفقًا للأسلوب الذي يتناسب على النحو الأمثل مع ميولنا ومواهبنا الخاصة.

ليست الآراء الحالية عن الجمال هي التي تتنوَّع فحسب، وإنما تتباين التوجهات كذلك بمرور الوقت، كما هو الحال في الفن. وخير مثال على ذلك تخصُّص موري جيلمان، وهو الديناميكا اللونية الكمية.

استنَدَ جيلمان في افتراضه عن القوة النووية القوية إلى رؤية متبصرة عبقرية بشأن الكيفية التي يمكن بها للجسيمات العديدة — التي كانت تُكتشَف باستمرار في ستينيات القرن العشرين — أن تُنظَّم في نماذج معقولة يمكنها تفسير وفرة هذه الجسيمات وأنواعها. وقد افترض جيلمان وجود المزيد من الجسيمات الأولية الأساسية المعروفة باسم الكواركات، وهي الجسيمات التي اقترَحَ أنها تحمل نوعًا جديدًا من الشحنات؛ ومن ثَمَّ يمكن للقوةِ النوويةِ القويةِ التأثيرُ على أي جسم يحمل الشحنة المفترَضة، وتتسبَّب في ارتباط الكواركات معًا مكوِّنة بذلك جسيمات متعادلة، مثلما تربط القوة الكهربائية الإلكترونات بالنوى المشحونة لتكون ذرات متعادلة الشحنة. وإن كان ذلك صحيحًا، يمكن تفسير جميع الجسيمات التي يتم اكتشافها كحالات مرتبطة لهذه الكواركات؛ أي أجسام كلية ليست لها شحنة صافية.

أدرك جيلمان أنه إذا كانت هناك ثلاثة أنواع مختلفة من الكواركات، كلٌّ منها يحمل شحنة لونية مختلفة، فسيتكوَّن العديد من المجموعات من الحالات المرتبطة المتعادلة الشحنة. وهذه المجموعات يمكن أن تتماشى مع العدد الوفير من الجسيمات التي عُثِر عليها (وهذا ما حدث بالفعل)، وبذلك توصَّلَ جيلمان إلى تفسير جميل لما بدا فوضى من الجسيمات يتعذَّر تفسيرها.

لكن عندما طرَحَ موري — ومعه الفيزيائي (الذي تخصَّصَ بعد ذلك في البيولوجيا العصبية) جورج زفايج — هذه الفكرة للمرة الأولى، لم يصدِّق الناس أنها نظرية علمية مناسبة. وكان السبب في ذلك فنيًّا بعض الشيء، لكنه مثير للاهتمام في الوقت ذاته؛ فحسابات فيزياء الجسيمات تعتمد على الجسيمات التي لا تتفاعل أثناء وجودها بعيدة عن بعضها البعض، وبذلك يمكننا حساب الآثار المحدودة للتفاعلات التي تحدث عندما تكون الجسيمات قريبة من بعضها البعض. وفي إطار هذا الافتراض، يمكن لأي تفاعل أن تسيطر عليه بالكامل القوى المحلية عندما تكون الجسيمات قريبة من بعضها البعض.

على الجانب الآخَر، كانت القوة التي افترضها جيلمان تزداد قوةً مع ابتعاد الجسيمات بعضها عن بعض، وعنى ذلك أن الكواركات ستتفاعل دائمًا، حتى عندما تكون متباعدة للغاية. ووفقًا للمعايير السائدة آنذاك، لم يتفق افتراض جيلمان مع أي نظرية حقيقية يمكن استخدامها لإجراء حسابات يُعتمَد عليها. وبما أن الكواركات تتفاعل دائمًا، فإنه حتى الحالات المعروفة بحالات المقاربة — وهي الحالات التي تشتمل على كواركات بعيدة عن كل شيء آخَر — تكون معقَّدَة للغاية. وفي إثبات واضح لمفهوم القبح، لم تكن حالات

المقارَبَة المفترضة هذه هي الجسيمات البسيطة التي ترغب في رؤيتها في أي نظرية قابلة للحساب.

في البداية، لم يعرف أحد كيفية تنظيم الحسابات بين هذه الحالات المعقَّدَة المترابطة بقوة، لكن وجهة نظر الفيزيائيين حاليًّا بشأن القوة القوية مختلفة تمامًا؛ فنحن نفهمها الآن على نحو أفضل بكثير من فهمنا لها عند طرح الفكرة للمرة الأولى. وقد حاز كلٌّ من ديفيد جروس وديفيد بوليتزر وفرانك فيلتشيك على جائزة نوبل لما أسموه «الحرية المتقاربة». وفقًا لحسابات هؤلاء العلماء، لا تكون القوة قوية إلا عند مستويات منخفضة من الطاقة، أما عند المستويات المرتفعة، فالقوة القوية لا تكون أقوى كثيرًا من القوى الأخرى؛ ومن ثَمَّ تسير الحسابات هكذا كما يجب. وفي الواقع، يعتقد بعض الفيزيائيين الآن أن نظريات مثل القوة القوية، التي تصير أضعف عند مستويات الطاقة العالية، هي «وحدها» النظريات المحدَّدة جيدًا؛ نظرًا لأن قوة التفاعل لن تصل إلى مستوًى غير محدود عند الطاقة العالية مثلما يمكن أن تفعل خلاف ذلك.

إن نظرية جيلمان حول القوة القوية نموذج مثير للاهتمام للعلاقة المتبادلة بين المعايير الجمالية والعلمية. كانت البساطة دليله الأول، لكن موافقة الجميع على جمال اقتراحه تطلَّبَت أفكارًا نظرية وحسابات علمية صعبة.

ليس هذا هو المثال الوحيد على هذه النقطة بالطبع، فالكثير من النظريات التي نثق في صحتها بها جوانب قبيحة ومنفرة للغاية ظاهريًّا رفضها الجميع في البداية، بما في ذلك كبار العلماء المرموقين. على سبيل المثال، نظرية المجال الكمي، التي تجمع بين ميكانيكا الكم والنسبية الخاصة، هي أساس فيزياء الجسيمات بأكملها، رغم ذلك رفض الفيزيائي الإيطالي الحائز على جائزة نوبل، إنريكو فيرمي، (وآخرون غيره) هذه النظرية في البداية. كانت المشكلة، من وجهة نظره، هي أنه على الرغم من أن نظرية المجال الكمي تضفي جانبًا وصفيًّا ونظاميًّا على جميع الحسابات وتتوصَّل إلى العديد من التنبؤات السليمة، فإنها تتضمن تقنيات حسابية حتى الفيزيائيون المعاصرون يرونها مفرطة التأنُّق؛ فتتسم بعض جوانب هذه النظرية بالجمال البالغ، وتؤدي إلى أفكار متبصرة مميزة. لكن ثمة خصائص أخرى يلزم علينا تحمُّلها، رغم عدم إعجابنا بما يحيط بها من تعقيدات.

تكرَّرَتْ هذه القصة مرات عدة منذ ذلك الحين، فلا يُتَّفَق على الجمال غالبًا إلا بعد إدراكنا للصورة الكلية. تنتهك التفاعلاتُ الضعيفةُ التناظرَ المتكافئَ؛ بمعنى أن

الجسيمات التي تدور ناحية اليسار تتفاعل على نحو مختلف عن تلك التي تدور ناحية اليمين، وانتهاك هذا التناظر الأساسي للتكافؤ بين اليمين واليسار يبدو مزعجًا وغير جذاب بطبيعته. لكن عدم التناظر هذا هو المسئول عن الكتل العديدة التي نراها في العالم والضرورية للبنية والحياة. عُدَّ هذا النوع من عدم التناظر قبيحًا في البداية، لكننا نعلم الآن أنه ضروري، ورغم أن كسر التناظر المتكافئ قبيح في حد ذاته، فإنه يصل بنا إلى تفسيرات جميلة لظواهر أكثر تعقيدًا تلعب دورًا مهمًّا في جميع صور المادة التي نراها.

ليس الجمال أمرًا مطلقًا، فالفكرة قد تروق لصاحبها، لكنها قد تبدو من منظور شخص آخَر مزعجةً أو فوضوية. على سبيل المثال، يغمرني أحيانًا شعورٌ بجمال أحد الافتراضات التي توصَّلْتُ إليها، ويكون السبب الرئيسي في ذلك هو معرفتي بفشل جميع الأفكار الأخرى التي طرحها الآخرون، لكن كون الفكرة أفضل من الأفكار السابقة لها لا يعني بالضرورة أنها جميلة. ونظرًا لأنني أعددت الكثير من النماذج التي شعرت بجمالها، لكنها قُوبِلت بالتشكُّك والارتياب من الزملاء الذين لم يعرفوا الكثير عن هذه النماذج، فقد توصَّلْتُ إلى أن المعيار الأفضل لكون الفكرة جيدة هو أن يعجب بها شخص ما لم يدرس المشكلة من قبلُ قطُّ.

والعكس يكون صحيحًا في بعض الأحيان أيضًا؛ بمعنى أن الأفكار الجيدة تُنبَذ لأن أصحابها أنفسهم هم مَن يرونها قبيحة للغاية. على سبيل المثال، لم يؤمن ماكس بلانك بالفوتونات؛ إذ كان يراها مبدأً كريهًا للغاية، رغم أنه مَن طرح السلسلة المنطقية التي أدَّتْ إلى افتراض وجود هذه الجسيمات. أينشتاين كذلك رأى أن فكرة تمدُّد الكون الناتجة عمَّا وضعه من معادلات النسبية العامة لا يمكن أن تكون صحيحة، ويرجع أحد أسباب ذلك إلى أن هذه الفكرة تتعارض مع ميوله الفلسفية والجمالية. لعل هاتين الفكرتين لم يَبْدُ عليهما أنهما الأجمل آنذاك، لكن قوانين الفيزياء — والكون الذي تنطبق عليه هذه القوانين — لم تأبَهْ لذلك كثيرًا.

المظهر الجميل

نظرًا لطبيعة الجمال المتطورة غير الثابتة، يجدر التفكير في بعض الخصائص التي قد تجعل فكرةً أو صورةً ما جميلة جمالًا موضوعيًّا على نحو يروق للجميع تقريبًا. ولعل

أهم سؤال يتعلق بالمعايير الجمالية هو ما إذا كان لدى البشر أي معايير عامة لما هو جميل في أي سياق، سواء أكان فنًّا أم علمًا.

لا يعلم أحد الإجابة عن هذا السؤال حتى الآن؛ فالجمال في نهاية الأمر يتضمن الذوق، والذوق يمكن أن يكون معيارًا ذاتيًّا. رغم ذلك، فإنني أجد من الصعوبة بمكان أن أصدِّق أن البشر ليست لديهم معايير جمال مشتركة، فأنا ألاحظ عادةً اتساقًا مذهلًا في آراء الناس بشأن أفضل عمل فني في معرض ما، أو بشأن أي المعارض يختار الناس زيارتها. لا يُثبِت ذلك بالطبع أيَّ شيء لأننا نتشارَكَ جميعًا المكان والزمان في هذه الحالات. والمعتقدات المتعلقة بالجمال يصعب عزلها عن الفترة الزمنية أو السياق الثقافي الذي نشأت فيه؛ ومن ثَمَّ يصعب التفريق بين الأحكام والقِيَم المتأصلة وتلك المكتسبة، لكن في بعض الحالات المتطرفة يمكن أن يتفق الناس جميعًا على جمال شيء ما أو قبحه. وفي بعض الحالات النادرة، قد يتفق الجميع على جمال فكرة ما، لكن حتى في هذه الحالات القليلة، لا يتفق الناس بالضرورة على كل التفاصيل.

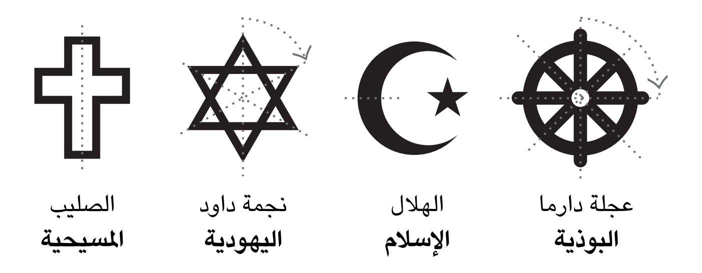
ومع ذلك، تبدو بعض المعايير الجمالية عامةً بالفعل، فأي فصل دراسي للمبتدئين في الفن يتعلَّم فيه الطلاب مفهومَ التوازن، وخير مثال على ذلك تمثال داوود للفنان مايكل أنجلو في معرض أكاديميا بفلورنسا. يقف داوود منتصبًا برشاقة وبهاء على نحو يستحيل معه تصوُّر انقلابه أو سقوطه. يبحث الناس عن التوازن والتناغم أينما يمكنهم العثور عليهما، لكن التوازن بالطبع قد يكون أيضًا مبدأ تنظيميًّا فحسب. يذهلنا الفن أيضًا عندما يتحدَّى ما لدينا من مفاهيم عن التوازن، كما هو واضح في منحوتات ريتشارد سيرا المبكرة (انظر الشكل ١٥-١).

يُعتبَر التناظر كذلك عادةً عنصرًا ضروريًّا في الجمال، ويعكس الفن والهندسة المعمارية في أحيان كثيرة النظام الذي ينتج عنه. يتمتع الشيء بالتناظر عندما يكون بوسعك تغييرُه — مثلًا عن طريق تدويره، أو عكسه في المرآة، أو تبديل القطع المكوِّنة له — على نحو يتعذَّر معه تمييز النظام الناتج عن النظام الأولي. ولعل الذي يتميَّز به التناظُر أحد أسباب اتسام الرموز الدينية به، ومن الأمثلة على ذلك الصليبُ في المسيحية، ونجمةُ داوود في اليهودية، وعجلةُ دارما في البوذية، والهلالُ في الإسلام؛ والموضحة جميعها في الشكل ١٥-٢.

يتوسَّع الفن الإسلامي في هذا الشأن؛ إذ يتميَّز هذا الفن، الذي يحرم التمثيل ويعتمد على الأشكال الهندسية، باستخدامه للتناظر. ومن الأمثلة الرائعة على ذلك ضريح تاج




شكل ١٥-١: توضِّح هذه المنحوتات المبكرة لريتشارد سيرا أن الفن يكون أحيانًا أكثر إثارةً عندما يبدو غير متوازن بعض الشيء. (حقوق الطبع والنشر لعام ٢٠١١ محفوظة لريتشارد سيرا/جمعية حقوق الفنانين بنيويورك.)

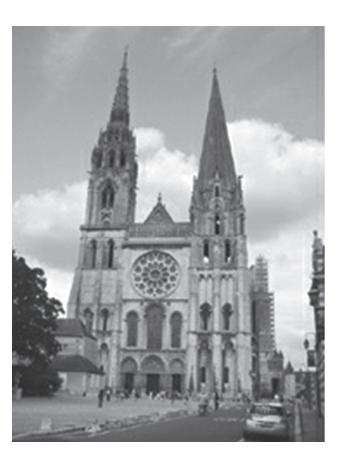


شكل ١٥-٢: تجسِّد الرموز الدينية عادةً نماذج متناظرة.

محل في الهند، فلم أتحدَّث مع أي شخص سبقت له زيارة هذا الصرح ولم تأسره روعة التنظيم والأشكال والتناظر به. أما قصر الحمراء الموجود في جنوب إسبانيا، والذي يعكس الفن المغربي وما يميِّزه من نماذج تناظُر مذهلة، فلعله أحد أجمل المباني التي لا تزال قائمة حتى يومنا هذا.

يعكس الفن الحديث، ومن أمثلته أعمال إلزوورث كيلي أو بريدجيت رايلي، التناظُرَ على نحو هندسي واضح. استغلَّ كذلك الفن والعمارة القوطية والفن والعمارة في عصر النهضة (انظر مثلًا كنيسةَ شارتر وسقفَ كنيسة سيستين) التناظرَ بإتقان وإجادة (انظر الشكل ١٥-٣).

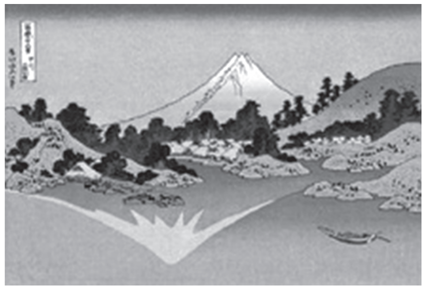




شكل ١٥-٣: يجسد الفن المعماري لكلٍّ من كاتدرائية شارتر وسقف كنيسة سيستين مفهوم التناظر.

ومع ذلك، فإن الفن يكون عادةً في أبهى صوره عندما لا يكون تام التناظر. فيتميز الفن الياباني على سبيل المثال بأناقته، لكنه يشتهر في الوقت نفسه بمخالفته الصريحة لمفهوم التناظُرِ، وتتسم الشبكات الحريرية واللوحات اليابانية بتوجيهها الواضح لِعَين المُشاهِد إلى جميع أنحاء اللوحة، كما هو موضَّح في الشكل ١٥-٤.

إن البساطة من المعايير الأخرى التي تساعد أحيانًا في تقييم الجمال، وتنبع هذه البساطة أحيانًا من التناظرات، لكن النظام الأساسي لها يمكن أن يتواجَد حتى في غياب التناظر الواضح. على سبيل المثال، أعمال جاكسون بولوك الفنية تتسم ببساطة جوهرية تكمن في كثافة الألوان، رغم أنها قد تبدو للوهلة الأولى فوضوية. فمع أن لطخات الألوان الفردية تبدو عشوائية تمامًا، فإن أشهر أعمال هذه الفنان وأكثرها نجاحًا هي تلك التي تتسم بكثافة متجانسة إلى حدٍّ ما لكلِّ لون في العمل.




شكل ١٥-٤: يُعَدُّ عدم التناظر أحد أسباب جمال الفن الياباني.

البساطة في الفن يمكن أن تكون خادعة في كثير من الأحيان. فذات مرة، حاولتُ رسم بعض من أكثر أعمال الفنان ماتيس بساطةً، وهي التي رسمها حين كان شيخًا وَهِنًا، لكنني عندما حاولت تقليدها، أدركت أنها لم تكن بهذا القدر من البساطة الذي تصوَّرْتُه، على الأقل بالنسبة ليدَيَّ غير الماهرتين في الرسم. إن العناصر البسيطة يمكن أن تجسِّد تنظيمًا أكبر مما نلاحظه ظاهريًّا.

وفي كافة الأحوال، لا يقتصر وجود الجمال على الأشكال الأساسية البسيطة فحسب، فبعض الأعمال الفنية التي تنال إعجاب الجماهير، مثل أعمال رفائيل وتيتيان، تتضمن أقمشة رسم معقَّدَة غنية بالعديد من العناصر الداخلية. ففي النهاية، البساطة التامة يمكن أن تكون مملة للغاية. وعندما نشاهد الفن، فإننا نفضِّل رؤية شيء مثير للاهتمام يجذب أعيننا؛ فنحن نريد شيئًا بسيطًا بالقدر الذي يسمح لنا بمتابعته، شريطةَ ألَّا يصل في بساطته إلى حدِّ الملل. وهذه على ما يبدو هي السمة المميزة لبنية العالم الذي نعيش فيه أيضًا.

الجمال في العلم

إن معايير الجمال يصعب تحديدها؛ ففي العلم — كما هو الحال في الفن — ثمة موضوعات مشتركة، لكن ما من وجود للأفكار المطلقة. وعلى الرغم من أن معايير الجمال

في العلم قد تكون غير محددة على نحو واضح، فإنها مفيدة وكلية الوجود. فتعمل هذه المعايير على إرشادنا في أبحاثنا، حتى إذا لم تضمن لنا النجاح أو الوصول للحقيقة.

وتتشابه معايير الجمال التي نطبِّقها على العلم مع المعايير التي تناولناها فيما سبق فيما يتعلق بالفن. فتلعب التناظرات، بلا ريب، دورًا مهمًّا في هذا الشأن؛ إذ تساعدنا في تنظيم حساباتنا وتربط عادةً الظواهر المتباينة. المثير في الأمر أن هذه التناظرات — كما هو الحال في الفن — تكون عادةً تقريبية فقط، فأفضل الأوصاف العلمية تتحرَّى عادةً الأناقة الموجودة في النظريات التي تتسم بالتناظر، لكنها تشتمل في الوقت نفسه على كسر لهذا التناظر، وهذا الكسر ضروري للتوصُّل إلى تنبؤات بشأن عالمنا؛ فكسر التناظُر يثري الأفكار التي تشملها ويؤدي إلى مزيد من القدرة التفسيرية. وكما هو الحال عادةً مع الفن، يمكن للنظريات التي تضم كسرًا للتناظر أن تكون أكثر جمالًا وإثارةً للاهتمام من تلك التي تتسم بتناظر مثالي.

وخير مثال على ذلك آلية هيجز المسئولة عن كتل الجسيمات الأولية. تفسِّر هذه الآلية — مثلما سنوضِّح في الفصل التالي — على نحو بليغ كيف يمكن للتناظرات المترابطة بفعل القوة الضعيفة أن تنكسر بقدر ما. إننا لم نكتشف بعدُ بوزون هيجز — ذلك الجسيم الذي سيقدِّم لنا دليلًا حاسمًا على صحة هذه الفكرة — لكن الفكرة جميلة للغاية، وتتوافق على نحو فريد مع المعايير التي تتطلبها النظرية والتجارب على حدٍّ سواء، الأمر الذي يدفع معظم الفيزيائيين للإيمان بأنها تتحقق في الطبيعة.

تُعَدُّ البساطة كذلك من المعايير المهمة غير الموضوعية لدى الفيزيائيين النظريين، فلدينا إيمان راسخ بأن العناصر البسيطة هي أساس الظواهر المعقَّدَة التي نراها، والبحث عن هذه العناصر الأساسية البسيطة التي يتألَّف منها الواقع بأسره أو يشبهها بدأ منذ عهود قديمة. ففي اليونان القديمة، تصوَّرَ أفلاطون وجود هيئات مثالية؛ أشكال هندسية وكائنات نموذجية ليست الأجسام الموجودة على الأرض سوى صور تقريبية لها فقط. آمَن أرسطو كذلك بالهيئات المثالية، لكنه رأى أن هذه الهيئات التي تشبهها الأجسام المادية لن تظهر لنا إلا عن طريق الملاحظة. تفترض كذلك الأديان عادةً حالة أكثر مثالية أو توحُّدًا حُرِم منها الواقع، وإن ظلت مرتبطة به على نحو ما، حتى قصة هبوط آدم من الجنة تفترض جدلًا وجود عالم مثالي سابق للعالم الذي نعيش فيه. ورغم أن الأسئلة والأساليب التي تتناولها الفيزياء الحديثة مختلفة كليةً عن تلك التي تناولها أسلافنا، يسعى العديد من الفيزيائيين كذلك إلى كونٍ أبسط، ليس من الناحية الدينية أو الفلسفية، وإنما من حيث المكونات الأساسية التي يتألَّف منها عالمنا.

والبحث عن الحقيقة العلمية الجوهرية يتضمن عادةً بحثًا عن عناصر بسيطة يمكننا استخدامها في تشكيل الظواهر المعقَّدَة والثرية التي نلاحظها. ينطوي هذا البحث غالبًا على محاولة للتعرُّف على المبادئ التنظيمية أو النماذج ذات المعنى، ولا يتوقع أغلب العلماء احتمال صحة اقتراحٍ ما إلا عن طريق الإدراك الدقيق للأفكار البسيطة الجميلة. ونقطة البدء التي تتضمن أقل عدد من المدخلات تكون أكثر نفعًا؛ لأنها تَعِدُ بأعلى مستوًى من القدرة التنبُّئية. وعندما يدرس فيزيائيو الجسيمات الاقتراحاتِ المتعلقةَ بما يمكن أن يمثِّل أساس النموذج القياسي، يصيبهم الشك عادةً عندما يصبح تحقُّقُ فكرةٍ ما مزعجًا للغاية.

ومرة أخرى، كما هو الحال مع الفن، يمكن للنظريات الفيزيائية أن تكون بسيطة في حدِّ ذاتها، لكنها قد تكون تراكيب معقَّدَة مكوَّنَة من عناصر بسيطة ويمكن التنبؤ بها. والنتيجة النهائية ليست بالضرورة بسيطة، حتى عندما تكون المكونات الأولية — بل ربما القواعد أيضًا — كذلك.

وأبعد ما يمكن أن تصل إليه مثل هذه المحاولات هو البحث عن نظرية جامعة تحتوي فقط على عدد من العناصر البسيطة التي تخضع لمجموعة صغيرة من القواعد. هذا سعي طموح، وربما يصفه البعض بالجرأة، لكن ثمة عقبة جلية تَحُول دون وصولنا إلى نظرية أنيقة تضع في الاعتبار كافة الملاحظات؛ أَلَا وهي أن العالم من حولنا لا يعكس سوى جزء فقط من البساطة التي ينبغي لهذه النظرية تجسيدها. والنظرية الموحدة، رغم بساطتها وأناقتها، لا بد أن تتسم بقدر كافٍ من البنية كي تتفق مع الملاحظات. لكم نرغب في الإيمان بوجود نظرية واحدة بسيطة وأنيقة ويمكن التنبؤ بها تقوم على أساسها الفيزياء بأسرها، لكن الكون ليس بهذا القدر من النقاء والبساطة والتنظيم الذي تتسم به النظريات. وحتى في ظل وجود وصف موحد أساسي، سيستلزم الأمر عددًا هائلًا من الأبحاث لربط هذا الوصف بالظواهر المعقَّدَة المذهلة التي نشهدها في عالمنا.

يمكننا بالطبع التوسُّع أكثر في هذه الأوصاف المتعلقة بالجمال أو البساطة، وثمة مزحة يتداولها الطلاب عادةً في فصول العلوم أو الرياضيات تتعلق بالأساتذة الذين يشيرون مرارًا وتكرارًا للظواهر المفهومة جيدًا على أنها «تافهة»، بغض النظر عن مدى تعقيدها. فهؤلاء الأساتذة يعلمون جيدًا الإجابات المتعلقة بهذه الظواهر، وما تقوم عليه من منطق وعناصر أساسية، لكن ذلك لا ينطبق على الطلاب الذين يجلسون أمامهم في

الفصل الدراسي. ويمكن أن تصير هذه المشكلات تافهةً في نظرهم أيضًا، بعد تحليلهم لها إلى عناصر بسيطة، لكنهم في حاجة أولًا إلى اكتشاف كيفية فعل ذلك.

بناء النماذج

في النهاية، وكما هو الحال في الحياة، لا يوجد في العلم معيار واحد فقط للجمال، فنحن لا نملك سوى بعض البديهيات — إلى جانب القيود التجريبية — التي نستخدمها كعناصر إرشادية في بحثنا عن المعرفة. والجمال — سواء في الفن أو العلم — قد يشتمل على بعض الجوانب الموضوعية، لكن أي تطبيق له يتضمن غالبًا تذوُّقًا ونزعة ذاتية.

لكن ثمةَّ فارقًا أساسيًّا يميِّز العلماء عن الفنانين في هذا الشأن. ففي العلم، تكون الكلمة الأخيرة للتجارب فيما يتعلَّق بتحديد الأفكار الصحيحة، هذا إن كانت إحداها صحيحة على الإطلاق. وقد تستغل التطورات العلمية المعايير الجمالية، لكن التقدُّم العلمي الحقيقي يتطلَّب أيضًا استيعابًا للبيانات، والتنبؤ بها وتحليلها. فمهما بدت أي نظرية جميلة، يظل خطؤها أمرًا محتملًا، وفي هذه الحالة لا بد من طرحها جانبًا. وحتى أكثر النظريات إرضاءً للعقل، لا بد من نبذها إذا لم تكن تنطبق على العالم الحقيقي.

مع ذلك، وقبل أن يصل الفيزيائيون إلى الطاقات العالية أو المؤشرات البعيدة اللازمة لتحديد الأوصاف الفيزيائية الصحيحة، لا يكون أمامهم خيار سوى توظيف الاعتبارات الجمالية والنظرية في تخمين ما يتجاوز حدود النموذج القياسي. وأثناء هذه المرحلة المؤقتة، وفي ظل امتلاك قدر محدود من البيانات، يعتمد الفيزيائيون على الألغاز الموجودة بالفعل، بالإضافة إلى معايير التذوُّق والتنظيم، في تحديد الوجهة المستقبلية لهم.

في الأحوال المثالية، يود العلماء التمكُّن من العمل على نتائج مجموعة متنوعة من الاحتمالات، و«بناء النماذج» هو الأسلوب الذي يتبعونه من أجل فعل ذلك. على سبيل المثال، أعمل أنا وزملائي على استكشاف العديد من نماذج فيزياء الجسيمات التي تمثِّل تخمينات للنظريات الفيزيائية التي قد يقوم عليها النموذج القياسي، ونهدف من هذا العمل إلى التوصُّل للمبادئ البسيطة التي تنظم الظواهر المعقدة التي تظهر في نطاقات أكثر وضوحًا لنتمكَّنَ بذلك من حلِّ الألغاز الحالية التي تكتنف فهمنا.

ويأخذ واضعو النماذج مفهوم النظرية الفعَّالة، والرغبة في فهم النطاقات الأصغر حجمًا، على محمل الجد. فنحن نتبع منهجًا «تصاعديًّا» يبدأ بما نعرفه — سواء من

الظواهر التي يمكننا تفسيرها أو تلك التي نجدها محيرة — ثم نحاول استنتاج النموذج الأساسي الذي يفسِّر العلاقات بين خصائص الجسيمات الأولية وتفاعلاتها.

قد يثير مصطلح «نموذج» في الذهن بنية مادية، مثل الهياكل المصغرة التي تُستخدَم لعرض الهندسة المعمارية لبناءٍ ما واستكشافها، ويمكن أن يثير في الذهن كذلك عملياتِ المحاكاة الرقمية على الكمبيوتر التي تحسب نتائج مبادئ فيزيائية معينة، مثل النمذجة المناخية أو نماذج المناخ المستخدمة في دراسة انتشار الأمراض المعدية.

أما في فيزياء الجسيمات، فتختلف النمذجة عن هذين التعريفين، لكن ثمة عاملًا مشتركًا بين نماذج الجسيمات والعارضين في المجلات أو عروض الأزياء؛ فكلاهما يعرضان أفكارًا جديدة إبداعية. ينجذب الناس في البداية للأفكار الجميلة، أو على الأقل للأفكار الأكثر غرابةً وإثارةً للدهشة، لكنهم في النهاية ينجذبون للواعدة منها بحق.

وغني عن القول أنَّ أوْجه التشابه تنتهي عند هذا الحد.

فنماذج فيزياء الجسيمات هي تخمينات لما يمكن أن تقوم عليه النظريات التي اختُبِرت تنبؤاتها واستوعبتها عقولنا بالفعل، والمعايير الجمالية مهمة في تحديد الأفكار الجديرة بالمتابعة، لكن الاتساق والقابلية للاختبار من المعايير المهمة كذلك في تحديد هذه الأفكار. والنماذج تميِّز المبادئ والمكونات الفيزيائية المختلفة الأساسية التي تسري على مسافات وأحجام أصغر من تلك التي تم اختبارها بالفعل تجريبيًّا. وباستخدام هذه النماذج، يمكننا تحديد جوهر الافتراضات النظرية المختلفة وعواقبها.

إن النماذج وسيلة لاستخلاص الاستنتاجات مما هو معلوم بالفعل بهدف اقتراح نظريات أكثر شموليةً وأكثر قدرةً على التفسير، وتكون هذه الاقتراحات نموذجية بحيث يمكن إثبات صحتها أو عدم صحتها بمجرد أن تسمح لنا التجارب بالتوغُّل إلى مسافات أصغر أو طاقات أعلى، واختبار الفرضيات والتنبؤات التي تقوم عليها.

جدير بالذكر هنا أن «النظرية» تختلف عن «النموذج»، ولا أقصد هنا بمصطلح «النظرية» التكهنات المحضة، مثلما يشير الاستخدام الدارج لها. فالجسيمات المعروفة والقوانين الفيزيائية المعلومة التي تخضع لها هذه الجسيمات هي مكونات لنظرية ما، والمقصود بالمكونات هنا مجموعة محددة من العناصر والمبادئ مصحوبة بقواعد ومعادلات تتنبَّأ بكيفية تفاعل هذه العناصر.

لكن حتى عندما نستوعب نظرية ما وآثارها استيعابًا كاملًا، يمكن تطبيق هذه النظرية بطرق شتى، وهذه الطرق يكون لها نتائج مادية متباينة على أرض الواقع.

والنماذج وسيلة لعرض هذه الاحتمالات، ونحن نجمع بين العناصر والمبادئ الفيزيائية المعلومة في أوصاف محتملة للواقع.

إذا نظرت مثلًا إلى النظرية على أنها قالب ببرنامج باوربوينت، فسيكون النموذج هو العرض التقديمي الذي ستقدِّمه باستخدام هذا البرنامج. تسمح النظرية بالصور المتحركة، أما النموذج فلا يتضمن سوى الصور التي تحتاج إليها لعرض فكرتك. وستنص النظرية على ضرورة وجود عنوان وبعض الرموز النقطية، أما النموذج فسيتضمن بالضبط ما ترغب في التعبير عنه وسينطبق — إذا حالَفَك الحظ — جيدًا على المهمة التي تضطلع بتنفيذها.

لقد تغيَّرَتْ طبيعة بناء النماذج في الفيزياء وفقًا للأسئلة التي حاوَلَ الفيزيائيون الإجابة عنها، فتتضمن الفيزياء دائمًا محاولة التنبؤ بأكبر عدد من الكميات الفيزيائية من أقل عدد من الافتراضات، لكن ذلك لا يعني أنه يمكننا التعرف على النظريات الجوهرية على الفور؛ فالتطورات في الفيزياء تحدث غالبًا حتى قبل استيعاب كل شيء على المستوى الأكثر جوهرية.

على سبيل المثال، في القرن التاسع عشر، استوعب الفيزيائيون مفهومَي الحرارة والضغط، ووظَّفوهما في الديناميكا الحرارية وتصميم المحركات قبل أن يتمكَّنَ أحدٌ من تفسير السبب وراء هاتين الفكرتين على نحو أكثر دقةً وجوهريةً بفترة طويلة. كان السبب في هذه الحالة هو الحركة العشوائية لعدد كبير من الذرات والجزيئات. وفي مطلع القرن العشرين، حاوَلَ العلماء بناء نماذج لتفسير الكتلة من حيث الطاقة الكهرومغناطيسية، ورغم أن هذه النماذج قامت على معتقدات راسخة مشتركة بشأن كيفية عمل هذه الأنظمة، فقد أثبتت هذه النماذج خطأ هذه المعتقدات. وبعد ذلك بفترة قصيرة، صنع نيلز بور نموذجًا للذرة لتفسير الأطياف الانبعاثية التي لُوحِظت، لكن سرعان ما حلَّتْ نظرية ميكانيكا الكم الأكثر شموليةً محلَّ هذا النموذج، وهي النظرية التي استوعبت نظرية بور الأساسية، لكن مع تحسينها.

يسعى واضعو النماذج حاليًّا إلى تحديد ما يتجاوز إطار النموذج القياسي لفيزياء الجسيمات. ورغم الإشارة إلى هذا النموذج حاليًّا بالنموذج القياسي نظرًا لاختباره واستيعابه جيدًا، فقد كان تخمينًا للكيفية التي قد تتلاءم بها الملاحظات المعروفة معًا وقت تطوُّرها. مع ذلك، ونظرًا لأن النموذج القياسي انطوى على تنبؤات تتعلَّق بكيفية اختبار الأسس التي يقوم عليها، تمكَّنَتِ التجارب في النهاية من إثبات صحته.

يقدِّم النموذج القياسي تفسيرات صحيحة حتى يومنا هذا لجميع الملاحظات، لكن الفيزيائيين على يقين بعدم اكتمال هذا النموذج؛ فهو — على نحو أكثر تحديدًا — لا يجيب عن السؤال المتعلق بالجسيمات والتفاعلات المحدَّدة — عناصر قطاع هيجز — المسئولة عن كتل الجسيمات الأولية، والسبب وراء امتلاك الجسيمات الموجودة في هذا القطاع للكتل المحددة التي تمتلكها. والنماذج التي تتجاوز حدود النموذج القياسي توضِّح العلاقات والارتباطات المحتملة التي قد تتعلَّق بهذه الأسئلة، وهي تشتمل على خيارات محدَّدة للافتراضات الأساسية والمفاهيم الفيزيائية، بالإضافة إلى نطاقات الطاقة أو المسافة التي قد تسري عليها.

ينطوي قدر كبير من أبحاثي الحالية على التفكير في نماذج جديدة، بالإضافة إلى الاستراتيجيات البحثية الحديثة أو الأكثر تفصيلًا التي يمكن إغفال الظواهر الجديدة في حال عدم اتباعها؛ فأفكِّر في النماذج التي وضعتُها، لكن مع الوضع في الاعتبار جميع الاحتمالات الأخرى أيضًا. يعرف فيزيائيو الجسيمات أنواع العناصر والقواعد التي قد تلعب دورًا فيما يدرسونه، مثل الجسيمات والقوى والتفاعلات المسموح بها، لكنهم لا يعرفون بالضبط أيًّا من هذه المكونات ينطبق على الواقع. ومن خلال تطبيق المكونات النظرية المعروفة، نحاوِل التعرُّف على الأفكار الأساسية البسيطة المحتملة التي تدخل فيما يصير في النهاية نظريةً معقَّدَة للغاية.

على القدر نفسه من الأهمية، تقدِّم النماذج أهدافًا للاستكشاف التجريبي، واقتراحات حول النهج الذي ستتبعه الجسيمات في إطار مسافات أصغر مما درسه الفيزيائيون تجريبيًّا حتى الآن. وتقدِّم القياسات أدلة للمساعدة في التمييز بين العناصر المرشحة المتنافسة. فنحن لا نعلم النظرية الأساسية الحديثة حتى الآن، لكن يمكننا مع ذلك تحديد الانحرافات الممكنة عن النموذج القياسي، ومن خلال التفكير في النماذج المرشحة للواقع الأساسي ونتائجها، يمكننا التنبؤ بما من المفترض أن يكشفه مصادم الهادرونات الكبير في حال ثبتَتْ صحة النماذج. واستخدامنا للنماذج يثبت الطبيعة التنبُّئية لأفكارنا، ويكشف عن العدد الهائل من الاحتمالات التي قد تتفق مع البيانات الموجودة بالفعل، ويفسِّر الظواهر التي لا تزال محيِّرَة. بعض النماذج فقط ستثبت صحتها، لكن بناء النماذج وفهمها هو أفضل وسيلة لوصف الخيارات وبناء قدر احتياطي من المكونات المثيرة للاهتمام.

يساعد استكشاف النماذج ونتائجها المُفصَّلة في تحديد ما ينبغي أن تبحث عنه التجارب، أيًّا كان؛ فالنماذج توضِّح للفيزيائيين التجريبيين الملامحَ المثيرةَ للاهتمام التي

تتَّصِف بها النظريات الفيزيائية الحديثة ليتمكَّنوا من اختبار ما إذا كان واضعوا النماذج قد تعرَّفوا على نحو صحيح على العناصر أو المبادئ الفيزيائية التي توجِّه العلاقات والارتباطات الخاصة بالنظام أم لا. وأي نموذج يتضمن قوانين فيزيائية جديدة تنطبق على الطاقات القابلة للقياس يجب أن يتنبَّأ بالجسيمات الجديدة والعلاقات الجديدة بينها. وملاحظة أي الجسيمات ينتج عن التصادمات، وما يجب أن تتسم به من خصائص، تساعد في تحديد نوع الجسيمات الموجودة وكتلها والتفاعلات بينها. والعثور على جسيمات جديدة أو تفاعلات القياس المختلفة يؤكِّد على النماذج المقترحة أو يستبعدها، ويمهِّد الطريق لنماذج أفضل.

في وجود القدر الكافي من البيانات، تحدِّد التجارب النماذج الأساسية الصحيحة، على الأقل على مستوى الدقة والمسافة والطاقة الذي يمكننا دراسته. وما نأمل فيه هو أن تكون قواعد النظرية الأساسية بسيطة بما يكفي للسماح لنا باستكشاف أثر القوانين الفيزيائية ذات الصلة، وحسابها في ظل أصغر نطاقات المسافات التي يمكننا الوصول إليها في طاقات مصادم الهادرونات الكبير.

ثمة مناقشات مثيرة تدور بين الفيزيائيين بشأن أفضل النماذج التي ينبغي دراستها وأكثر الطرق نفعًا لتضمينها في الأبحاث التجريبية. فأجلس عادةً مع زملائي من الفيزيائيين التجريبيين وأتناقَش معهم حول أفضل كيفية لاستخدام النماذج لإرشادنا في أبحاثنا، ونطرح أسئلةً من قبيل: هل النقاط القياسية ذات المؤشرات المحددة في نماذج بعينها عناصرُ دقيقةُ التحديدِ؟ هل هناك سبيل أفضل لتغطية كافة الاحتمالات؟

تتسم تجارب مصادم الهادرونات الكبير بصعوبتها الشديدة؛ فدون أهداف بحثية محدَّدة، سوف يغلب النموذج القياسي على النتائج. فقد صُمِمت التجارب وطُوِّرت مع وضع النماذج الحالية في الاعتبار، لكنها تبحث عن احتمالات أكثر عموميةً أيضًا. ومن المهم أن يعي الفيزيائيون التجريبيون مجموعةً كبيرةً من النماذج التي تشتمل على العلامات المميزة الجديدة المحتملة التي قد تظهر؛ فلا يرغب أحد في أن تتسبَّب نماذج بعينها في انحياز الأبحاث انحيازًا شديدًا.

يعمل الفيزيائيون النظريون والتجريبيون جاهدين للتأكُّد من عدم إغفال أي شيء. ولا يمكننا معرفة أي الاقتراحات المختلفة صحيح — هذا إن كان أحدها صحيحًا على الإطلاق — حتى تتأكَّد صحته تجريبيًّا. والنماذج المقترحة قد تكون هي الوصف الصحيح للواقع، لكن حتى لو لم تكن كذلك، فإنها تقترح استراتيجيات بحثية مثيرة للاهتمام

توضِّح لنا السمات المميزة للمادة التي لم تُكتشَف بعدُ. ونحن نأمل في أن يقدِّم لنا مصادم الهادرونات الكبير الإجابات — أيًّا كانت — ونودُّ أن نكون متأهِّبين لذلك.

الفصل السادس عشر

بوزون هيجز

استيقظتُ يوم ٣٠ مارس عام ٢٠١٠ على كمٍّ هائل من رسائل البريد الإلكتروني التي تناولت موضوع نجاح التصادمات التي جرت في الليلة السابقة بطاقة ٧ تيرا إلكترون فولت في سيرن. مثَّل هذا النجاح نقطة الانطلاق للبرنامج الفيزيائي الفعلي بمصادم الهادرونات الكبير، وقد كان التعجيل والتصادمات التي أُجرِيت قرب نهاية العام السابق محطات مهمة من الناحية الفنية؛ إذ كانت لها أهمية للفيزيائيين التجريبيين العاملين بالمصادم الذين تمكَّنوا أخيرًا من معايرة الكواشف وفهمها على نحو أفضل عن طريق استخدام البيانات المستقاة من تصادمات حقيقية بمصادم الهادرونات الكبير، وليس مجرد أشعة كونية تصادَفَ مرورها عبر الجهاز. لكن على مدار العام ونصف العام التالي، لزم على الكواشف بسيرن تسجيل البيانات الحقيقية التي يمكن للفيزيائيين استخدامها لتقييد النماذج أو التصديق على صحتها. وأخيرًا، وبعد التقلبات العديدة التي شهدها برنامج الفيزياء بالمصادم، بدأ العمل.

بدأ البرنامج وفق ما كان مخطَّطًا له إلى حدٍّ كبير، وهو ما اعتبره زملائي من الفيزيائيين التجريبيين أمرًا طيبًا نظرًا لمخاوفهم التي عبَّروا عنها في اليوم السابق بشأن وجود الصحفيين، وما قد يُسفِر عنه ذلك من إعاقة لتحقيق الأهداف الفنية. وشهد بالفعل الصحفيون (وجميع الحاضرين) بعض محاولاتِ البدء الفاشلة، والتي رجع أحد أسبابها إلى آليات الحماية الدقيقة التي صُمِّمت بحيث تنطلق في حال وقوع أي خطأ، مهما كان بسيطًا. لكن في غضون ساعات قليلة، دارت الحُزَم وتصادَمَتْ، وصار لدى الصحف والمواقع الإلكترونية العديد من الصور الرائعة التي يمكنها عرضها.

والطاقة البالغة ٧ تيرا إلكترون فولت، التي جرت عندها التصادمات، تساوي نصف الطاقة التي من المفترض للمصادم العمل بها. بَيْدَ أنه لن يصل إلى الطاقة الفعلية

المستهدفة له — البالغة ١٤ تيرا إلكترون فولت — إلا بعد سنوات طوال. ودرجة السطوع المستهدفة لتشغيل ٧ تيرا إلكترون فولت — وهو الرقم الذي يشير إلى عدد البروتونات التي تتصادم كل ثانية — كانت أقل بكثير مما خطَّطَ له المصمِّمون في البداية. رغم ذلك، صار كل شيء في مصادِم الهادرونات الكبير كما يجب أخيرًا بفضل هذه التصادمات، وتمكَّنَّا أخيرًا من الاعتقاد بأن ثمَّةَ تحسُّنًا سيطرأ قريبًا على فهمنا الحالي للطبيعة الداخلية للمادة. وإذا سار كل شيء على ما يرام، فسوف يتوقَّف تشغيل الجهاز في خلال بضعة أعوام لإعداده، ثم يعود بعد ذلك للعمل بكامل قدرته ليقدِّم الإجابات الحقيقية التي ننتظرها.

ومن أهم الأهداف التي نبغيها معرفةُ كيفية اكتساب الجسيمات الأساسية لكتلتها. فلماذا لا يتحرك كل شيء بسرعة الضوء، وهو ما يحدث إذا كانت كتلة المادة تساوي صفرًا؟ تعتمد الإجابة عن هذا السؤال على مجموعة الجسيمات المعروفة إجمالًا باسم «قطاع هيجز»، وتشمل بوزون هيجز. ويوضِّح لنا هذا الفصل السبب وراء أهمية الأبحاث الناجحة التي تتناول هذا الجسيم في إثبات صحة أفكارِنا عن تكوُّن كتل الجسيمات الأساسية. والأبحاث التي ستُجرَى عند عودة مصادم الهادرونات الكبير للعمل بشدة أعلى وطاقة أكبر من المنتظر أن توضِّح لنا الجسيمات والتفاعلات التي تقوم عليها هذه الظاهرة المميزة.

آلية هيجز

ما من فيزيائي يشكِّك في صحة النموذج القياسي في إطار الطاقات التي درسناها حتى الآن؛ فقد اختبرت التجارب صحة العديد من تنبؤات هذا النموذج التي جاءت متماشيةً مع التوقعات بدقة تزيد عن واحد في المائة.

لكن النموذج القياسي يعتمد على مكوِّن لم يرصده أحدٌ من قبلُ، وهو آلية هيجز المسمَّاة على اسم الفيزيائي البريطاني بيتر هيجز. هذه الآلية هي الوسيلة الوحيدة التي نعرف أنها تمنح الجسيمات الأولية كتلتها دائمًا. فوفقًا للأسس التي تقوم عليها الصورة الأولية للنموذج القياسي، لا بد أن تساوي كتلة البوزونات المقياسية التي تنقل الطاقة، والجسيمات الأولية — مثل الكواركات واللبتونات اللازمة للنموذج القياسي — صفرًا. لكن قياسات الظواهر الفيزيائية تُثبِت عكس ذلك بوضوح؛ فكتل الجسيمات الأولية مهمة لفهم ظواهر الفيزياء الذرية وفيزياء الجسيمات، مثل نصف قطر مدار

الإلكترون في الذرة أو النطاق الدقيق للغاية للقوة الضعيفة، بالإضافة بالطبع لتكون بنية الكَوْن. تحدِّد الكتل كذلك قَدْر الطاقة اللازم لتكوين الجسيمات الأولية، وفقًا للمعادلة ط = ك س[٢]. لكن دون وجود آلية هيجز، تظل كتل الجسيمات الأولية في النموذج القياسي معضلة، فهي غير مسموح بوجودها.

وعدم تمتُّع الجسيمات بحقٍّ راسخٍ في امتلاك كتلة خاصة بها قد يبدو أمرًا استبداديًّا؛ فالمتوقع من الناحية المنطقية أن تملك الجسيمات دومًا خيارَ امتلاكِ كتلة لا تتعرض للاضمحلال، لكن البنية الدقيقة للنموذج القياسي وأي نظرية من نظريات القوى تتسم بهذا القدر من الاستبداد بالفعل؛ إذ إنها تقيِّد أنواع الكتل المسموح بها. وتفسير ذلك قد يبدو مختلفًا بعض الشيء فيما يتعلَّق بالبوزونات المقياسية عن الفرميونات، لكن المنطق الأساسي في الحالتين يتعلَّق بالتناظرات التي تمثِّل جوهر أي نظرية للقوى.

يشمل النموذج القياسي لفيزياء الجسيمات القوة الكهرومغناطيسية، والقوة الضعيفة، والقوة النووية القوية، وكلٌّ من هذه القوى يرتبط بتناظر معين، ودون هذه التناظرات، ستتنبَّأ النظرية — التي تشير ميكانيكا الكم والنسبية الخاصة إلى أنها تصف أوضاع التذبذب — بوجود الكثير من أوضاع التذبذب للبوزونات المقياسية، وهي الجسيمات التي تنقل هذه القوى. وفي النظرية التي تخلو من التناظرات، تؤدي الحسابات النظرية إلى تنبُّؤات غير منطقية، مثل زيادة احتمالات تفاعلات الطاقة العالية عن احتمالات أوضاع التذبذب العرضية. وفي أي وصف دقيق للطبيعة، يجب حذف الجسيمات غير الفيزيائية؛ أي الجسيمات التي ليس لها وجود فعلي؛ لأنها تتذبذب في الاتجاه الخاطئ.

وفي هذا السياق، تعمل التناظرات مثل مرشحات البريد الإلكتروني المزعج، أو قيود مراقبة الجودة. على سبيل المثال، قد تفرض متطلبات الجودة الإبقاء على السيارات التي تتسم بالتوازن التناظري فقط، وهو ما من شأنه أن يضمن عمل جميع السيارات التي ينتجها المصنع على النحو المتوقع. والتناظرات في أي نظرية للقوى تستبعد أيضًا العناصر ذات السلوك السيئ؛ وذلك لأن التفاعلات بين الجسيمات غير الفيزيائية غير المرغوب فيها لا تحترم التناظرات، في حين تتذبذب الجسيمات التي تتفاعل على النحو الذي يحافظ على التناظرات الضرورية كما ينبغي. ومن ثَمَّ، فإن التناظرات تضمن ألَّا تشمل التنبؤات النظرية سوى الجسيمات الفيزيائية؛ ومن ثَمَّ تكون منطقية وتتوافَقُ مع التجارب.

ومن ثَمَّ، تسمح التناظرات بصياغة أنيقة لنظريات القوى. فبدلًا من حذف الأوضاع غير الفيزيائية في كلٍّ تذبذُبٍ واحدًا تلو الآخَر، تحذف التناظرات جميع الجسيمات غير الفيزيائية مرةً واحدةً؛ وبذلك لا تتضمن أي نظرية بها تفاعلات تناظرية سوى أوضاع التذبذب الفيزيائية التي نرغب في وصف سلوكها.

ينطبق ذلك على نحو مثالي على أي نظرية للقوى تشتمل على حاملات قوًى ذات كتلة صفرية، مثل القوة الكهرومغناطيسية أو القوى النووية القوية. وفي النظريات التناظرية، جميع تنبؤات الطاقة العالية تكون منطقية، والأوضاع الفيزيائية فقط — أي الأوضاع الموجودة في الطبيعة — هي التي تتضمنها هذه النظريات. وفيما يتعلَّق بالبوزونات المقياسية العديمة الكتلة، يمكن حلُّ مشكلة التفاعلات العالية الطاقة على نحوٍ مباشِرٍ نسبيًّا؛ نظرًا لأن قيود التناظُرِ المناسِب تستبعد أي أوضاع غير فيزيائية سيئة الأداء من النظرية.

وبذلك، فإن التناظرات تحلُّ مشكلتين؛ إذ تستبعد الأوضاع غير الفيزيائية، وكذا تنبؤات الطاقة العالية السيئة التي قد تصاحِب هذه الأوضاع. لكن البوزون المقياسي ذا الكتلة غير الصفرية يكون له وضع تذبذُب فيزيائي آخر — موجود في الطبيعة. ومن الأمثلة على ذلك البوزوناتُ المقياسية التي تنقل القوة النووية الضعيفة، فتستبعد التناظرات العديد من أوضاع تذبذب هذه البوزونات. ودون وجود مكون جديد، لا يمكن لكتل البوزونات الضعيفة احترام تناظرات النموذج القياسي. أما بالنسبة للبوزونات المقياسية ذات الكتلة غير الصفرية، فلا خيار أمامنا سوى الحفاظ على النموذج ذي الأداء السيئ؛ ومعنى ذلك أن حلَّ السلوكِ السيئ للطاقة العالية ليس بسيطًا. رغم ذلك، لا يزال هناك شيء لازِم لتنتج النظرية تفاعلات منطقية عالية الطاقة.

بالإضافة إلى ذلك، لا يمكن لأيٍّ من الجسيمات الأولية في النموذج القياسي الخالي من جسيم هيجز أن يكون لها كتلة تحترم تناظراتِ أبسطِ نظريات القوى. وفي ظل ارتباط التناظرات بالقوى الموجودة، لن يكون للكواركات واللبتونات في النموذج القياسي الخالي من جسيم هيجز أيضًا أي كتلة، ويبدو أن السبب في ذلك لا علاقة له بمنطق البوزونات المقياسية، وإنما يمكن أن يرجع في النهاية إلى التناظرات أيضًا.

سبق وعرضنا في الفصل الرابع عشر من هذا الكتاب جدولًا تضمَّنَ الفرميونات التي تدور ناحية اليمين وناحية اليسار. والفرميونات هي الجسيمات التي يقترن بعضها ببعض في وجود كتل غير صفرية، فعندما تكون كتل الكواركات أو اللبتونات غير صفرية،

تُحدِث هذه الكتل تفاعلاتٍ تحوِّل الفرميونات التي تدور ناحية اليسار إلى أخرى تدور ناحية اليمين، لكن لكي تصبح جميع هذه الفرميونات قابلةً للتحويل فيما بينها، ينبغي أن تخضع للقوى ذاتها. لكن التجارب أثبتت أن أثر القوة الضعيفة على الفرميونات التي تدور ناحية اليسار يختلف عن أثرها على الفرميونات التي تدور ناحية اليمين، والتي قد تتحول إليها الكواركات أو اللبتونات الثقيلة. وهذا الانتهاك لتناظر الاقتران — الذي في حال الحفاظ عليه سيتعامَلُ مع اليسار واليمين كعناصر متكافئة في قوانين الفيزياء — يسبِّب الدهشة لأي شخص يعرفه لأول مرة؛ فقوانين الطبيعة المعروفة الأخرى لا تميِّز بين اليمين واليسار. بَيْدَ أن هذه الخاصية المميزة — تفريق القوة الضعيفة بين اليسار واليمين — قد أثبتَتْها التجارب، وتُعَدُّ سمة أساسية للنموذج القياسي.

وتوضِّح لنا التفاعلات المختلفة للبتونات والكواركات اليمنى واليسرى أنه بدون مكون جديد، لن تتوافَق كتل الكواركات واللبتونات غير الصفرية مع القوانين الفيزيائية المعروفة، وسترتبط هذه الكتل بين الجسيمات التي تحمل شحنةً ضعيفةً والجسيمات التي لا تحمل هذه الشحنة.

بعبارة أخرى، نظرًا لأن الجسيمات اليسرى فقط هي التي تحمل هذه الشحنة، من الممكن فقدان الشحنة الضعيفة. ستختفي الشحنات في «الفراغ»، والفراغ هو حالة للكون لا تحتوي على أي جسيمات. وبوجه عام، لا ينبغي أن يحدث ذلك، وإنما يجب الحفاظ على الشحنات؛ فإذا ظهرت شحنة ما واختفت، فستنكسر التناظرات المرتبطة بالقوة المعنية، وتعاوِد التنبؤات الاحتمالية العجيبة المتعلِّقة بتفاعلات البوزونات المقياسية العالية الطاقة — التي من المفترض أن تزيلها هذه التناظرات — الظهور مجدَّدًا. يجب ألَّا تختفي الشحنات فجأةً على هذا النحو إذا كان الفراغ خاويًا حقًّا ولا يحتوي على أي جسيمات أو مجالات.

لكن الشحنات يمكن أن تظهر وتختفي إذا كان الفراغ ليس خاويًا حقًّا، ولكنه يحتوي على «مجال هيجز» الذي يزوِّد هذا الفراغ بالشحنة الضعيفة. ومجال هيجز — حتى ذلك الذي يزوِّد الفراغ بالشحنة — لا يتألَّف من جسيمات فعلية، وإنما هو في الأساس توزيعٌ للشحنة الضعيفة بكافة أنحاء الكون، لا يحدث إلا عندما تكون قيمة المجال ذاته غير صفرية. وعندما يكون مجال هيجز غير مضمحل، يكون الأمر كما لو كان الكون يتمتَّع بمورد غير محدود للشحنات الضعيفة. تخيَّلْ أنك تتمتَّع بمورد غير محدود للمال؛ فستتمكن من الإقراض أو السحب منه عند رغبتك في ذلك، وسيظل معك

رغم ذلك كمية غير محدودة منه. وبالمثل، يمد مجال هيجز الفراغ بكمية غير محدودة من الشحنة الضعيفة، وأثناء ذلك يكسر المجال التناظرات المرتبطة بالقوى، ويسمح للشحنات بالتدفُّق إلى داخل الفراغ وخارجه، لتنشأ بذلك الكتل دون التسبُّب في أي مشكلات.

من الطرق التي يمكن بها تصوُّر العلاقة بين آلية هيجز ونشأة الكتلِ، النَّظَرُ إلى هذه الآلية بوصفها تسمح للفراغ بالتصرُّف مثل سائل دبق يحمل شحنةً ضعيفةً؛ بمعنى أن مجال هيجز متغلغل في الفراغ. والجسيمات التي تحمل هذه الشحنة، مثل البوزونات المقياسية الضعيفة وكواركات ولبتونات النموذج القياسي، يمكنها التفاعل مع هذا السائل، وهذه التفاعلات تُبطِئ من حركة هذه الجسيمات، وهذا الإبطاء يتوافَق بدوره مع الجسيمات التي تكتسب كتلةً؛ نظرًا لأن الجسيمات دون كتلة تنتقل عبر الفراغ بسرعة الضوء.

تُعرَف هذه العملية الدقيقة التي تكتسب من خلالها الجسيمات الأولية كتلتها باسم آلية هيجز، وهي لا توضِّح لنا كيفية اكتساب الجسيمات الأولية لكتلتها فحسب، وإنما أيضًا تمنحنا بعض المعلومات بشأن خواص هذه الكتل. على سبيل المثال، تفسِّر هذه الآلية ثقل وزن بعض الجسيمات، وخفة وزن جسيمات أخرى. ويرجع السبب ببساطة إلى أن الجسيمات التي تتفاعل أكثر مع مجال هيجز يكون لها كتل أكبر، أما التي تتفاعل أقل فيكون لها كتل أصغر. والكوارك القمي الأثقل وزنًا يكون له أكبر هذه التفاعلات، والإلكترون أو الكوارك العلوي، الذي يتسم بكتل صغيرة نسبيًّا، يكون أضعف بكثير في تفاعلاته.

تقدِّم آلية هيجز كذلك معلوماتٍ دقيقةً عن القوة الكهرومغناطيسية والفوتون الحامل لهذه القوة، فتوضِّح لنا هذه الآلية أن الجسيمات الحاملة لهذه القوة التي تتفاعل مع الشحنة الضعيفة الموزَّعَة بأنحاء الفراغ هي الوحيدة التي تكتسب كتلةً، ونظرًا لأن البوزون Z والبوزونين المقياسيين W تتفاعل مع هذه الشحنات، لا تضمحل كتلها. رغم ذلك، فإن مجال هيجز الذي يغمر الفراغ يحمل شحنةً ضعيفةً، لكنه متعادِل كهربائيًّا. لا يتفاعل الفوتون مع الشحنة الضعيفة؛ ومن ثَمَّ تظل كتلته صفرية، وبهذا يكون الفوتون مميزًا. ودون آلية هيجز، يكون هناك ثلاثةُ بوزونات مقياسية ضعيفة تبلغ كتلتها صفرًا، وحاملُ قوةٍ آخَرُ تبلغ كتلته صفرًا أيضًا، ويُعرَف بالبوزون المقياسي ذي الشحنة الزائدة. لن يذكر وقتها أحدٌ الفوتونَ أبدًا، لكن في ظل وجود مجال هيجز،

من شأن تركيبة فريدة فقط من البوزون المقياسي ذي الشحنة الزائدة وأحد البوزونات المقياسية الضعيفة الثلاثة ألَّا تتفاعل مع الشحنة في هذا الفراغ، وهذه التركيبة تحديدًا هي الفوتون الحامل للقوة الكهرومغناطيسية. وعدم امتلاك الفوتون لأي كتلة أمر ضروري للظواهر المهمة التي تنشأ عن القوة الكهرومغناطيسية. ويفسِّر ذلك سبب تمكُّن الموجات اللاسلكية من الانتشار لمسافات هائلة، في حين تنتشر القوة الضعيفة لمسافات قصيرة فقط. يحمل مجال هيجز شحنةً ضعيفةً، لكنها ليست شحنة كهربائية؛ لذا فإن الفوتون يملك كتلة صفرية، وينتقل بسرعة الضوء — كالمتوقع من جسيم عديم الكتلة — في حين تتسم الجسيمات الحاملة للقوة الضعيفة بثقل وزنها.

لا تتحَيَّرْ، فالفوتونات جسيمات أولية، لكن — بصورة ما — البوزونات المقياسية الأصلية أُسِيءَ تحديدها؛ لأنها لم تتوافق مع الجسيمات المادية التي لها كتل محددة (التي قد تبلغ صفرًا)، وتنتقل عبر الفراغ دون معيق. وإلى أن نعرف الشحنات الضعيفة التي تتوزع عبر الفراغ بواسطة آلية هيجز، ليست لدينا وسيلة لتحديد أيٌّ الجسيمات ذو كتلة صفرية وأيُّها ذو كتلة غير صفرية. ووفقًا للشحنات التي حدَّدتها آلية هيجز للفراغ، يتبادَلُ البوزونُ المقياسي ذو الشحنة الزائدة والبوزونُ المقياسيُّ الضعيفُ التحوُّلَ أحدُهما إلى الآخَرِ أثناء انتقالهما عبر الفراغ، ولا يمكننا تعيين كتلة محدَّدة لأيٍّ منهما. ومع الوضع في الاعتبار شحنة الفراغ الضعيفة، فإن الفوتون والبوزون Z فقط هما اللذان ينتقلان دون تغيُّر هويتهما أثناء انتقالهما عبر الفراغ، مع اكتساب بوزون Z لكتلة، وعدم حدوث ذلك مع الفوتون. وبهذه الصورة تميِّز آلية هيجز الجسيمَ المحدَّد المعروف باسم الفوتون والشحنة التي نعرفها باسم الشحنة الكهربائية التي يوصلها هذا الجسيم.

وهكذا تفسِّر آلية هيجز السبب وراء الكتلة الصفرية للفوتون، دونًا عن الجسيمات الأخرى الحاملة للقوى. تفسِّر كذلك آليةُ هيجز خاصيةً أخرى للكتل، وهذه الخاصية أكثر دقةً، لكنها تمنحنا معلومات دقيقة حول سبب سماح آلية هيجز بوجود الكتل المتوافقة مع التنبؤات المنطقية للطاقة العالية. فإذا تصوَّرْنا مجال هيجز سائلًا، يمكننا التصور أن كثافته ترتبط أيضًا بكتل الجسيمات، وإذا نظرنا لهذه الكثافة على أنها تنشأ من الشحنات ذات المسافات الثابتة، فإن هذه الجسيمات — التي تنتقل عبر مسافات قصيرة للغاية مما يجعلها لا تلتقي أبدًا بشحنة ضعيفة — ستنتقل كما لو كانت كتلتها تساوي صفرًا، في حين سترتطم الجسيمات التي تنتقل لمسافات أكبر بالشحنات الضعيفة وتقل سرعتها.

يتوافَق ذلك مع حقيقة ارتباط آلية هيجز ب «الكسر التلقائي» للتناظُر المرتبط بالقوة الضعيفة، وهذا الكسر يرتبط بنطاق محدَّد.

يحدث الكسر التلقائي للتناظر عندما يكون التناظر ذاته موجودًا في قوانين الطبيعة — كما هو الحال مع أي نظرية للقوى — لكنه ينكسر في الحالة الفعلية للنظام. ومثلما أوضحنا من قبلُ، لا بد من وجود التناظرات لأسباب ترتبط بسلوك الجسيمات في النظرية عند الطاقات العالية. والحل الوحيد إذن هو وجود التناظرات، لكنها تنكسر تلقائيًّا ليصير للبوزونات المقياسية الضعيفة كتلة، دون أن تعكس سلوكًا سيئًا عند الطاقات العالية.

الفكرة وراء آلية هيجز هي أن التناظُر بلا شك جزء من النظرية، وقوانين الفيزياء تعمل على نحو تناظري، لكن الحالة الفعلية للعالم لا تحترم هذا التناظر. فكِّرْ مثلًا في قلم رصاص يقف على طرفه، ثم يسقط، ويختار اتجاهًا معينًا في سقوطه. كانت جميع الاتجاهات حول القلم متساوية عندما كان منتصبًا، لكن هذا التناظر انكسر بمجرد أن سقط القلم؛ ومن ثَمَّ فإن القلم في وَضْعِه الأفقي يكسر تلقائيًّا التناظر الدوراني الذي حافَظَ عليه القلم المنتصب.

على النحو نفسه، تكسر آلية هيجز تناظُرَ القوة الضعيفة تلقائيًّا. ومعنى ذلك أن قوانين الفيزياء تحافِظ على التناظر، لكن حالة الفراغ المغمور بشحنة القوة الضعيفة تكسره. ومجال هيجز، الذي يتغلغل في الكون على نحو غير تناظري، يسمح للجسيمات باكتساب الكتلة؛ نظرًا لأنه يكسر تناظر القوة الضعيفة الذي كان سيظهر بدونه. تحتفظ نظرية القوى بتناظر مرتبط بالقوة الضعيفة، لكن هذا التناظر يكسره مجال هيجز الذي يتغلغل في الفراغ.

وبإدخال شحنة إلى الفراغ، تكسر آلية هيجز التناظُرَ المرتبط بالقوة الضعيفة، وهي تفعل ذلك في نطاق معين يحدِّده توزيع الشحنات في الفراغ. وعند الطاقات العالية، أو المسافات الصغيرة — كما تنص ميكانيكا الكم — لن تواجِه الجسيمات أيَّةَ شحنة ضعيفة، وستتصرف من ثَمَّ كما لو كانت عديمة الكتلة. فعند المسافات الصغيرة، أو الطاقات العالية، يبدو التناظر ساريًا، لكن على المسافات الكبيرة، تعمل الشحنة الضعيفة على نحو يشبه القوة الاحتكاكية بصور عدة؛ مما يتسبَّب في إبطاء الجسيمات. وفقط عند الطاقات المنخفضة، أو المسافات الكبيرة، يبدو أن مجال هيجز يمنح الجسيمات كتلة.

هذا بالضبط الوضع الذي نحتاج إلى وجوده، فالتفاعلات الخطيرة — التي لن يكون لها معنى مع الجسيمات الكبيرة — لا تحدث إلا عند الطاقات العالية. أما عند

الطاقات المنخفضة، فيمكن للجسيمات، بل يجب عليها وفقًا للتجارب، أن تمتلك كتلة. وآلية هيجز، التي تكسر تلقائيًّا تناظُرَ القوة الضعيفة، هي الوسيلة الوحيدة التي نعرف أنها تحقِّق هذه المهمة.

وبالرغم من أننا لم نرصد بعدُ الجسيمات المسئولة عن آلية هيجز المسئولة بدورها عن كتل الجسيمات الأولية، فلدينا أدلة تجريبية على وجود آلية هيجز في الطبيعة؛ فقد شوهدت عدة مرات في سياق مختلف كليةً؛ ألَا وهو سياق المواد «الفائقة التوصيل». تتحقق الموصلية الفائقة عندما تقترن الإلكترونات بعضها ببعض في أزواج، وهذه الأزواج تخترق مادةً ما. وما يُعرَف ب «ناتج التكثيف» في أي موصلٍ فائقٍ، يتكوَّن من أزواج من الإلكترونات تلعب الدور نفسه الذي يلعبه مجال هيجز في المثال الموضَّح أعلاه.

لكن بدلًا من الشحنة الضعيفة، يحمل ناتجُ التكثيف في الموصل الفائق شحنةً كهربائيةً؛ ومن ثَمَّ فهو يمنح الكتلة للفوتون الذي يوصل القوة الكهرومغناطيسية داخل المادة الفائقة التوصيل. وتحجب الكتلة الشحنة؛ ما يعني أن المجالين الكهربائي والمغناطيسي داخل الموصل الفائق لا يبعدان كثيرًا، وتنخفض القوة سريعًا للغاية على نطاق مسافة قصيرة. وتوضِّح لنا ميكانيكا الكم والنسبية الخاصة أن مسافة الحجب هذه داخل الموصل الفائق هي النتيجة المباشرة لكتلة الفوتون التي لا توجد سوى داخل الركيزة الفائقة التوصيل. وفي هذه المواد، لا يمكن للمجالات الكهربائية الوصول لمسافة أبعد من مسافة الحجب؛ لأنه عند ارتطام الفوتون بأزواج الإلكترونات التي تخترق الموصل الفائق، يكتسب هذا الفوتون كتلةً.

تعمل آلية هيجز على نحو مشابِهٍ لذلك، لكن بدلًا من تغلغل أزواج الإلكترونات (التي تحمل شحنة كهربائية) في المادة، نتنبَّأ بوجود مجال هيجز (يحمل شحنة ضعيفة) يتغلغل في الفراغ، وبدلًا من اكتساب الفوتون لكتلة تحجب الشحنة الكهربائية، تكتسب البوزونات المقياسية الضعيفة كتلةً تحجب الشحنة الضعيفة. وبما أن كتلة البوزونات المقياسية الضعيفة غير صفرية، لا تكون القوة الضعيفة فعَّالة إلا عند مسافات قصيرة للغاية يقل حجمها عن حجم النواة.

ولما كانت هذه الطريقة الوحيدة المُتَّسِقة لمنح البوزونات المقياسية كتلتها، فإن الفيزيائيين على ثقة تامة بأن آلية هيجز تنطبق على الطبيعة، وهم يتوقَّعون أنها المسئولة ليس فقط عن كتل البوزونات المقياسية، وإنما أيضًا عن كتل جميع الجسيمات الأولية. فهم لا يعرفون أي نظرية متَّسِقة أخرى تسمح لجسيمات النموذج القياسي ذات الشحنات الضعيفة باكتساب كتلة.

لقد كان ذلك جزءًا صعبًا مليئًا بالمفاهيم المجردة؛ إذ يرتبط مفهومَا آلية هيجز ومجال هيجز بطبيعتهما بنظرية المجال الكمي وفيزياء الجسيمات، ولا يتصلان بأيٍّ من الظواهر التي يمكننا تصورها فعليًّا؛ لذا دعوني أُلخِّص بعضًا من النقاط البارزة فيما سبق. دون آلية هيجز، سيتحتَّم علينا التخلِّي عن التنبؤات المعقولة المتعلقة بالطاقة العالية أو كتل الجسيمات، بَيْدَ أن هذين العاملين ضروريان للوصول إلى نظرية صحيحة. والحل هو وجود التناظر بالفعل في قوانين الطبيعة، لكن يمكن كسره تلقائيًّا بالقيمة غير الصفرية لمجال هيجز. وكسر تناظر الفراغ يسمح لجسيمات النموذج القياسي بأن يكون لها كتل غير صفرية، لكن نظرًا لأن الكسر التلقائي للتناظر يرتبط بنطاق الطاقة (والطول)، فإن آثاره لا ترتبط إلا بالطاقات المنخفضة فقط؛ أي نطاق الطاقة الخاص بكتل الجسيمات الأولية وما يقل عنه (ونطاق الطول الخاص بالقوة الضعيفة وما يزيد عليه). وفي إطار هذه الطاقات والكتل، يكون تأثير الجاذبية مهملًا، ويصف النموذج القياسي (مع وضع الكتل في الاعتبار) قياسات فيزياء الجسيمات وصفًا صحيحًا، لكن نظرًا لأن التناظر لا يزال موجودًا في قوانين الطبيعة، فإنه يسمح بوجود تنبؤات الطاقة العالية المعقولة، هذا فضلًا عن أن آلية هيجز تفسِّر كتلة الفوتون التي تساوي صفرًا على أنها نتيجةٌ لعدمِ تفاعُلِ هذا الجسيم مع مجال هيجز بجميع أنحاء الكون.

رغم نجاح هذه الأفكار نظريًّا، لا بد من العثور على أدلة تجريبية تؤكِّد صحتها، بل إن بيتر هيجز نفسه أَقَرَّ بأهمية هذه الاختبارات. وفي عام ٢٠٠٧، قال إنه يرى البنية الرياضية مرضيةً للغاية، لكن «إذا لم تثبت صحتها تجريبيًّا، فليس لها أي قيمة؛ فلا بد من إخضاعها للاختبار.»[1] وبما أن توقُّعاتنا تشير إلى أن اقتراح بيتر هيجز صحيح بالتأكيد، فإننا نتنبَّأ بالتوصُّل إلى اكتشاف مثير في غضون السنوات القليلة القادمة. ومن المفترض أن تظهر الأدلة في مصادم الهادرونات الكبير في صورة جسيم أو جسيمات. وفي أبسط صور تطبيق الفكرة، سيكون الدليل هو الجسيم المعروف باسم «بوزون هيجز».

البحث عن الأدلة التجريبية

يشير اسم «هيجز» إلى شخص وآلية، كما يشير أيضًا إلى جسيم من المفترض وجوده. هذا المكون الأساسي المفقود في النموذج القياسي هو بوزون هيجز،[2] وهو الأثر المحتمل لآلية هيجز الذي نتوقَّع أن تتوصَّل إليه تجارب مصادم الهادرونات الكبير، واكتشافه سيؤكِّد الأفكارَ النظرية، ويثبت لنا أن مجال هيجز ينتشر في الفراغ. لدينا من الأسباب

ما يجعلنا نؤمن بوجود آلية هيجز في الكَوْن؛ لأنه ما من أحد يعلم كيفية صياغة نظرية معقولة لكتل الجسيمات الأساسية بدون هذه الآلية. ونحن نؤمن أيضًا بأن أحد الأدلة على وجود هذه الآلية سيظهر قريبًا في نطاقات الطاقة التي يوشك مصادم الهادرونات الكبير على الوصول إليها، وهذا الدليل هو على الأرجح بوزون هيجز.

والعلاقة بين مجال هيجز الذي يُعَدُّ جزءًا من آلية هيجز، وبوزون هيجز — الجسيم الفعلي — علاقة دقيقة، لكنها تشبه كثيرًا العلاقة بين المجال المغناطيسي والفوتون. فيمكنك الشعور بآثار المجال المغناطيسي التقليدي عندما تمسك بمغناطيس بالقرب من الثلاجة، حتى وإن لم تكن هناك فوتونات فعلية قد تم إنتاجها. بالمثل، مجال هيجز التقليدي — أي المجال الذي يوجد حتى في غياب الآثار الكمية — ينتشر بجميع أنحاء الفضاء، ويمكن أن يكتسب قيمة غير صفرية تؤثِّر على كتل الجسيمات، لكن هذه القيمة غير الصفرية يمكن أن توجد حتى إن لم يحتوِ الفضاء على أي جسيمات فعلية.

لكن إذا «أثَّر» شيء ما على المجال — بمعنى أن يضيف إليه بعض الطاقة — فيمكن أن تتسبَّبَ هذه الطاقة في تقلُّبات بالمجال تؤدِّي بدورها إلى إنتاج الجسيمات. في حالة المجال الكهرومغناطيسي، الجسيم الذي سيُنتَج هو الفوتون، وفي مجال هيجز، الجسيم هو بوزون هيجز. يتغلغل مجال هيجز في أرجاء الفضاء، وهو المسئول أيضًا عن كسر التناظر الكهربي الضعيف. على الجانب الآخَر، ينشأ جسيم هيجز عن مجال هيجز حيث توجد طاقة، كما هو الحال في مصادم الهادرونات الكبير. إن الدليل على وجود مجال هيجز هو ببساطة امتلاك الجسيمات كتلة، واكتشاف بوزون هيجز في مصادم الهادرونات الكبير (أو أي مكان آخَر قد يتكوَّن فيه) سيؤكِّد لنا قناعتنا بأن آلية هيجز هي أصل هذه الكتل.

تطلِق الصحافة أحيانًا على بوزون هيجز اسم «جسيم الإله»، ويفعل ذلك أيضًا الكثيرون ممَّن يرون الاسم مثيرًا. الصحفيون معجبون بهذا الاسم لأنه يثير انتباه الناس، ولعل هذا هو السبب الذي شجَّع الفيزيائي ليون ليدرمان على استخدامه في المقام الأول، لكنه في النهاية مجرد اسم، ويجب عدم منحه أي دلالات أخرى.

قد يبدو حديثي نظريًّا بحتًا، لكن منطقَ وجودِ جسيم جديد يلعب دور بوزون هيجز قويٌّ للغاية؛ فبالإضافة للتبرير النظري الموضَّح أعلاه، يتطلَّب اتساق نظرية جسيمات النموذج القياسي الضخمة وجود هذا البوزون. افترض أن الجسيمات ذات الكتلة هي وحدها التي تمثِّل جزءًا من النظرية الأساسية، لكنه لا توجد آلية هيجز

لتفسير هذه الكتلة. في هذه الحالة، كما أوضحنا في جزء سابق من هذا الفصل، ستكون التنبؤات بتفاعلات الجسيمات العالية الطاقة غيرَ منطقية، بل ستطرح أيضًا احتمالات يستحيل تحقُّقها. نحن بالطبع لا نصدِّق هذا التنبؤ، فالنموذج القياسي دون بِنى إضافية سيكون ناقصًا، والحل الوحيد المتاح هو تقديم جسيمات وتفاعلات إضافية.

والنظرية التي تحتوي على بوزون هيجز تتجنَّب على نحو جيد مشكلات الطاقة العالية، والتفاعلات مع بوزون هيجز لا تغيِّر التنبؤ بالتفاعلات العالية الطاقة فحسب، وإنما أيضًا تلغي السلوك السيئ للطاقة العالية. ليست هذا مصادفة بالطبع، وإنما هو بالضبط ما تضمن آلية هيجز حدوثه. إننا لم نعلم بعدُ على وجه اليقين ما إذا كان تنبُّؤنا صحيحًا بشأن تطبيق آلية هيجز في الطبيعة أم لا، لكن الفيزيائيين واثقون تمامًا بأن جسيمًا ما أو جسيماتٍ ما جديدةً ستظهر في النطاق الضعيف.

بناءً على هذه الاعتبارات، نعلم أن أيًّا ما كان سيحافظ على النظرية — سواء أكان جسيمات أم تفاعلات جديدة — لا يمكن أن يكون ثقيلًا للغاية أو يحدث عند طاقات عالية للغاية. في غياب الجسيمات الإضافية، ستظهر تنبؤات خاطئة عند الطاقات التي تبلغ نحو ١ تيرا إلكترون فولت؛ ومن ثَمَّ ليس من المفترض أن يكون بوزون هيجز (أو أي شيء آخَر يلعب نفس دوره) موجودًا فحسب، وإنما يجب أن يكون خفيفًا بما فيه الكفاية ليسمح لمصادم الهادرونات الكبير بالعثور عليه. على نحوٍ أكثر دقة، اتضح أنه إذا لم تكن كتلة بوزون هيجز أقل من ٨٠٠ جيجا إلكترون فولت تقريبًا، فسيتوصَّل النموذج القياسي إلى تنبؤات مستحيلة بشأن التفاعلات العالية الطاقة.

ونحن نتوقع، في الحقيقة، أن يكون بوزون هيجز أخف كثيرًا من ذلك. تدعم النظريات الحالية فكرة خفة الوزن النسبية لبوزون هيجز، وتشير أغلب الأدلة النظرية إلى كتلة تكاد لا تزيد عن الكتلة الحالية الناتجة عن تجارب مصادم الإلكترونات-البوزيترونات الكبير في التسعينيات، والتي تبلغ ١١٤ جيجا إلكترون فولت. كان هذا أكبر بوزون تمكَّنَ مصادم الإلكترونات-البوزيترونات الكبير من إنتاجه واكتشافه، واعتقد الكثيرون أنهم قاب قوسين أو أدنى من العثور على البوزون المنشود. ويتوقع أغلب الفيزيائيين حاليًّا أن تكون كتلة بوزون هيجز قريبة للغاية من هذه القيمة، وألَّا تزيد على الأرجح عن ١٤٠ جيجا إلكترون فولت.

وأقوى الحُجَج المؤيدة لهذا التوقُّع بخفة وزن بوزون هيجز تستند إلى بيانات تجريبية؛ بمعنى أنها لا تستند إلى مجرد أبحاث عن بوزون هيجز نفسه، وإنما قياسات

لكميات أخرى بالنموذج القياسي. وتتفق تنبؤات النموذج القياسي مع القياسات على نحو مذهل، وأي انحرافات بسيطة يمكن أن تؤثِّرَ على هذا التوافُقِ. ويساهم بوزون هيجز في تنبؤات النموذج القياسي من خلال الآثار الكمية، فإذا كان ثقيلًا للغاية، فستكون هذه الآثار كبيرة جدًّا على نحو يحول دون حدوث توافُق بين التنبؤات النظرية والبيانات الفعلية.

يجب أن نتذكَّر هنا ما تنصُّ عليه ميكانيكا الكم من أن الجسيمات الافتراضية تساهم في أي تفاعل، فتظهر وتختفي لفترة قصيرة من أي حالة يُبدَأ بها، وتساهِم في التفاعل النهائي؛ لذا رغم أن الكثير من عمليات النموذج القياسي لا تتضمن بوزون هيجز على الإطلاق، فإن عملية تبادل جسيم هيجز تؤثِّر على تنبؤات النموذج القياسي كافةً، مثل معدل تحلُّل البوزون المقياسي Z إلى كواركات ولبتونات، والنسبة بين كتلة بوزونات Z وW. ويعتمد حجم الآثار الافتراضية لبوزون هيجز على اختبارات «دقة القوة الكهروضعيفة» هذه على كتلته. وقد ثبت أن التنبؤات لا تنطبق جيدًا إلا عندما تكون كتلة هيجز صغيرة.

السبب الثاني (والأكثر ترجيحًا) وراء الاعتقاد بخفة وزن بوزون هيجز يتعلق بنظرية تُسمَّى التناظر الفائق، والتي سنتناولها لاحقًا. يعتقد الكثير من الفيزيائيين أن التناظر الفائق موجود في الطبيعة، ووفقًا لهذا التناظر، ينبغي أن تكون كتلة بوزون هيجز قريبة من كتلة البوزون المقياسي Z المقيسة؛ ومن ثَمَّ فهي خفيفة نسبيًّا.

من ثَمَّ، ومع الوضع في الاعتبار التوقعات المشيرة إلى أن بوزون هيجز خفيف الوزن، يمكنك أن تتساءل: لماذا رأينا جميع جسيمات النموذج القياسي، ولم نَرَ بوزون هيجز بعدُ؟ تكمن الإجابة عن هذا السؤال في خصائص هذا البوزون؛ فحتى لو كان الجسيم خفيفًا، لا يمكننا أن نراه إلا إذا تمكَّنَتِ المصادمات من تكوينه واكتشافه، والقدرة على فعل ذلك تعتمد على خصائص هذا الجسيم. وعلى أي حال، ما من سبيل لرؤية جسيم لا يتفاعل مطلقًا، مهما خفَّ وزنه.

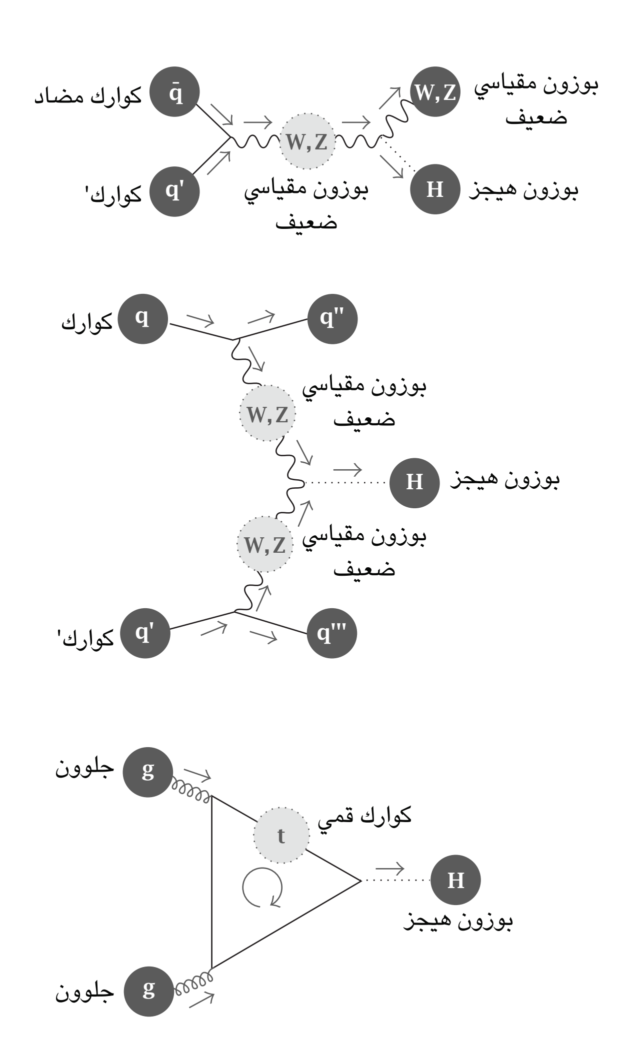
لدينا الكثير من المعلومات حول ما يجب أن تكون عليه تفاعلات بوزون هيجز؛ لأن بوزون هيجز ومجال هيجز — رغم أنهما كيانان مختلفان — يتفاعلان على نحو متشابه مع الجسيمات الأولية الأخرى. ومن ثَمَّ، فلدينا معلومات عن تفاعلات مجال هيجز مع الجسيمات الأولية، وهذه المعلومات مستمَدَّة من كتلة هذه الجسيمات. ونظرًا لأن آلية هيجز مسئولة عن كتل الجسيمات الأولية، فإننا نعلم أن مجال هيجز يتفاعل على أقوى

نحو مع الجسيمات الأثقل وزنًا، وبما أن بوزون هيجز ينشأ عن مجال هيجز، فإننا نعرف تفاعلاته أيضًا. وشأنه شأن مجال هيجز، يتفاعَل هذا البوزون على أقوى نحو مع جسيمات النموذج القياسي الأكبر في كتلتها.

هذا التفاعل الأقوى بين بوزون هيجز والجسيمات الأثقل وزنًا يشير إلى أن بوزون هيجز يسهل إنتاجه إذا بدأ التفاعل بجسيمات ثقيلة وحدث تصادم بينها ينتج عنه هذا البوزون. لكننا للأسف لا نبدأ التفاعلات بالجسيمات الثقيلة في المصادمات، كيف إذن — من هذا المنطلق — يمكن لمصادم الهادرونات الكبير إنتاج بوزونات هيجز، أو أي جسيمات أخرى؟ تشتمل التصادمات في هذا المصادم على جسيمات خفيفة. والكتلة الصغيرة لهذه الجسيمات توضِّح لنا أن التفاعل مع جسيم هيجز سيكون بسيطًا للغاية؛ بمعنى أنه إذا لم تتدخل أي جسيمات أخرى في إنتاج هيجز، فسيكون معدل هذا الإنتاج منخفضًا للغاية، بحيث لا يمكن اكتشاف أي شيء في أي مصادم شُيِّد حتى يومنا هذا.

لكن لحسن الحظ، تقدِّم ميكانيكا الكم بدائل لذلك. ويتم إنتاج بوزون هيجز على نحو دقيق في مصادمات الجسيمات التي تتضمَّن جسيمات ثقيلة افتراضية، فعندما تتصادم الكواركات الخفيفة ببعضها البعض، يمكن أن تنتج جسيمات ثقيلة تنتج بدورها بوزون هيجز. على سبيل المثال، يمكن للكواركات الخفيفة أن تتصادم لتنتج بوزون W افتراضي، وهو الصورة الأولى للبوزون المقياسي. هذا الجسيم الافتراضي يمكن أن ينتج بدوره بوزون هيجز (انظر الصورة الأولى بالشكل ١٦-١ للاطِّلَاع على هذا النمط من الإنتاج)، ونظرًا لأن بوزون W أثقل بكثير من الكواركات العلوية والسفلية داخل البروتون، فإن تفاعله مع بوزون هيجز يكون أقوى بكثير. وفي ظل القدر الكافي من تصادمات البروتونات، من المفترض أن ينتج بوزون هيجز على هذا النحو.

يتحقق أحد الأنماط الأخرى لإنتاج بوزون هيجز عندما تنتج الكواركات بوزونين مقياسيين ضعيفين افتراضيين يتصادمان بدورهما لينتجا بوزون هيجز واحدًا، كما يظهر في الصورة الثانية بالشكل ١٦-١. وفي هذه الحالة، ينتج بوزون هيجز رفقة دفقين مرتبطين بالكواركات التي تتطَايَر عندما تنبعث البوزونات المقياسية. هذه الآلية الإنتاجية والآلية السابقة تنتجان بوزون هيجز، لكنهما تنتجان معه جسيمات أخرى أيضًا. في الحالة الأولى، يصدر البوزون مرتبطًا بأحد البوزونات المقياسية، وفي الحالة الثانية — التي ستكون أكثر أهمية في مصادم الهادرونات الكبير — ينتج بوزون هيجز مصحوبًا بدفقين.

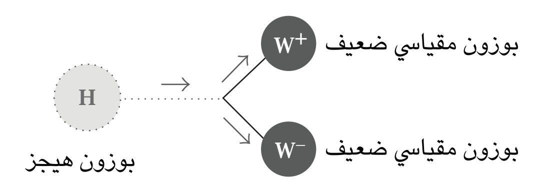


شكل ١٦-١: يعرض هذا الشكل ثلاثة أنماط من إنتاج بوزون هيجز، وهي بالترتيب (من أعلى لأسفل): إشعاع هيجز، واندماج بوزونَيْ W وZ، واندماج جلوونين.

لكن بوزونات هيجز يمكن أن تتكوَّن على نحو مستقل أيضًا. ويتحقَّق ذلك عندما تتصادم الجلوونات معًا لتكوِّن كواركًا قميًّا وكواركًا قميًّا مضادًّا يفنيان كلٌّ منهما الآخر

لينتجا بوزون هيجز، كما هو واضح بالصورة الثالثة. والكوارك القمي والكوارك المضاد له هما، في الواقع، كواركان افتراضيان لا يدومان فترة طويلة، لكن ميكانيكا الكم تنصُّ على أن هذه العملية تتكرَّر كثيرًا؛ لأن الكوارك القمي يتفاعَل بقوة شديدة مع بوزون هيجز، وآلية الإنتاج هذه — على عكس الآليتين السابقتين — لا تخلِّف أي أثر وراءها غير جسيم هيجز الذي يتحلَّل بعد ذلك.

لذا، رغم أن بوزون هيجز نفسه لا يكون بالضرورة ثقيلًا للغاية — إذ إن كتلته تكون على الأرجح مماثِلةً لكتلة البوزونات المقياسية الضعيفة وأصغر من كتلة الكوارك القمي — فإن الكواركات الثقيلة، مثل البوزونات المقياسية، أو الكواركات القمية، تدخل على الأرجح في عملية إنتاجه؛ ومن ثَمَّ فإن تصادمات الطاقة العالية، مثل التصادمات التي تجري في مصادم الهادرونات الكبير، تساعد في تسهيل إنتاج بوزون هيجز، مثلما يفعل المعدل الهائل لتصادمات الجسيمات.



شكل ١٦-٢: يمكن لبوزون هيجز الثقيل أن يتحلَّل إلى بوزونات W المقياسية.

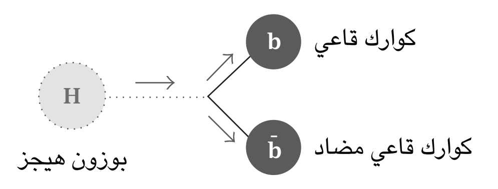
لكن رغم معدل الإنتاج الكبير، ثمة عائِقٌ آخَر يَحُول دون رصد بوزون هيجز؛ وهو الكيفية التي يتحلَّل بها. فبوزون هيجز — شأنه شأن العديد من الجسيمات الأخرى الأثقل وزنًا — ليس مستقرًّا، وتجدر الملاحظة هنا أن ما يتحلَّل هو جسيم هيجز، وليس مجاله؛ فمجال هيجز ينتشر عبر الفراغ ليمنح الكتلة للجسيمات الأولية، ولا يختفي. أما بوزون هيجز، فهو جسيم فعلي، وهو نتيجة آلية هيجز التي يمكن رصدها من خلال التجارب، وشأنه شأن الجسيمات الأخرى، يمكن إنتاجه في المصادمات، وهو لا يدوم للأبد، مثل غيره من الجسيمات غير المستقرة. ونظرًا لأن تحلُّلَه يحدث على الفور تقريبًا، فإن السبيل الوحيد للعثور عليه هو العثور على نواتج هذا التحلُّل. يتحلَّل بوزون هيجز

إلى الجسيمات التي يتفاعَل معها، وهي جميع الجسيمات التي تكتسب كتلة عن طريق آلية هيجز، والخفيفة بقدرٍ يكفي لإنتاجها. وعندما ينتج جسيم ما والجسيم المضاد له من تحلُّل بوزون هيجز، لا بد أن يكون وزن كلٍّ منهما أقل من نصف كتلة بوزون هيجز الأصلي للحفاظ على الطاقة. ومع وضع هذا المتطلب في الاعتبار، يتحلَّل جسيم هيجز أوليًّا إلى أثقل الجسيمات التي يمكنه إنتاجها، لكن ذلك يعني أن بوزون هيجز الخفيف نسبيًّا يندر تحلُّله إلى الجسيمات التي يسهل التعرُّف عليها وملاحظتها.

وإذا خالَفَ بوزون هيجز التوقعات، ولم يكن خفيفَ الوزن، وإنما أثقل من ضِعف كتلة بوزون W (لكن أقل من ضِعف كتلة الكوارك القمي)، فسيكون البحث عنه سهلًا نسبيًّا؛ فجسيم هيجز ذو الكتلة الكبيرة بما فيه الكفاية سيتحلَّل دومًا إلى بوزونات W أو Z (انظر الشكل ١٦-٢ للاطِّلَاع على التحلُّل إلى بوزونات W). ويعلم الفيزيائيون التجريبيون كيفية التعرُّف على بوزونات W وZ التي تدوم؛ ومن ثَمَّ فإن اكتشاف جسيم هيجز لن يكون عسيرًا للغاية.

نمط التحلل التالي — الأكثر ترجيحًا في هذا السيناريو المتعلِّق بجسيم هيجز الثقيل نسبيًّا — يتضمن التحلُّل إلى كوارك قاعي والجسيم المضاد له. إلا أن معدل التحلل إلى الكوارك القاعي والجسيمات المضادة له أقل بكثير؛ لأن كتلة الكوارك القاعي أصغر بكثير من كتلة البوزون المقياسي W؛ ومن ثَمَّ فإن تفاعله مع بوزون هيجز يكون أقل بكثير. والبوزون الذي يبلغ من ثقل الوزن ما يسمح بتحلُّله إلى بوزوني W يتحوَّل إلى كواركات قاعية بمعدل أقل من واحد في المائة. مع ذلك، يظل تحلُّل جسيم هيجز إلى بوزونات أخف وزنًا ممكنًا، وإن كان سيحدث بمعدل أقل؛ لذا إذا كان بوزون هيجز ثقيلًا نسبيًّا — أي أثقل مما توقَّعنا — فسوف يتحلَّل إلى بوزونات مقياسية ضعيفة. وعمليات التحلُّل هذه سيسهل رؤيتها نسبيًّا.

رغم ذلك، وكما أوضحنا سابقًا، فإن النظرية والبيانات التجريبية المتعلِّقة بالنموذج القياسي تشير إلى أن بوزون هيجز سيكون على الأرجح خفيفًا للغاية، ما يَحُول دون تحلُّله إلى بوزونات مقياسية ضعيفة. والتحلل الأكثر تكرارًا في هذه الحالة سيكون التحلُّل إلى كوارك قاعي وإلى الجسيم المضاد له، الكوارك القاعي المضاد (انظر الشكل ١٦-٣). وهذا التحلل يصعب رصده، وترجع هذه الصعوبة إلى أنه عند تصادم البروتونات، ينتج عدد كبير من الكواركات والجلوونات المتفاعلة بواسطة القوة القوية. ويمكن الخلط بين هذه الجسيمات والعدد الصغير من الكواركات القاعية الذي سيظهر نتيجة لتحلُّل



شكل ١٦-٣: سيتحلل بوزون هيجز الخفيف في الغالب إلى كواركات قاعية.

بوزون هيجز الافتراضي. وأهم سبب وراء هذه الصعوبة هو أن إنتاج عدد ضخم من الكواركات القمية في مصادم الهادرونات الكبير، وتحلُّل هذه الكواركات إلى كواركات قاعية، سيحجب جسيم هيجز أيضًا. ومن ثَمَّ، رغم أن معدل إنتاج بوزون هيجز في هذا النمط أكبر، فليس هذا هو النمط الأكثر ترجيحًا للعثور على جسيم هيجز في مصادم الهادرونات الكبير، وإن كان الفيزيائيون النظريون والتجريبيون سيتوصَّلون في الغالب إلى سُبُلٍ للاستفادة منه.

بناءً على ما سبق، يلزم على الفيزيائيين التجريبيين دراسة النواتج النهائية البديلة لعمليات تحلُّل جسيمات هيجز، وإن كانت ستظهر بمعدل أقل. وأكثر الجسيمات المرجَّح العثور عليها عند تحلل جسيمات هيجز هي التاوون والتاوون المضاد أو زوج من الفوتونات. جدير بالذكر هنا أن التاوونات هي الأثقل بين الأنواع الثلاثة للِّبتونات المشحونة، وأثقل الجسيمات التي يمكن أن يتحلَّل إليها بوزون هيجز على الإطلاق، بخلاف الكواركات القاعية. ومعدل التحلُّل إلى فوتونات أقل بكثير — فلا تتحلَّلُ بوزونات هيجز إلى فوتونات إلا من خلال الآثار الكمية الافتراضية — لكن يسهل اكتشافها نسبيًّا. رغم صعوبة هذا النمط، ستتمكَّن التجارب من قياس خواص الفوتونات على نحوٍ ممتازٍ بمجرد أن تتحلَّل بوزونات هيجز إليها على الفور، وتتمكن من ثَمَّ بالتأكيد من التعرُّف على بوزون هيجز الذي سيتحلَّل مكوِّنًا هذه الفوتونات.

نظرًا لتعقُّد عملية اكتشاف بوزون هيجز، تضع تجربتا أطلس واللولب المركب للميوونات استراتيجيات بحثية واضحة ودقيقة للعثور على الفوتونات والتاوونات. صُمِّمت الكواشف في هاتين التجربتين مع وضع فكرة الكشف عن بوزون هيجز في الاعتبار، فصُمِّمت المِسعَرات الموضَّحَة في الفصل الثالث عشر لقياس الفوتونات بدقة،

في حين تساعد كواشف الميوونات في تسجيل عمليات تحلُّل التاوونات الأثقل وزنًا. ومن المتوقَّع أن يثبت هذان النمطان معًا وجودَ بوزون هيجز. وبمجرد أن يُكشَف عن بوزون هيجز، نتعرَّف على خصائصه.

تَفرِض عمليتا الإنتاج والتحلُّل تحديات أمام اكتشاف بوزون هيجز، لكن الفيزيائيين النظريين والتجريبيين، ومصادم الهادرونات نفسه، على قدر هذا التحدي، ويأمل الفيزيائيون في أن يتمكَّنوا في غضون سنوات قليلة من الاحتفال باكتشاف بوزون هيجز، ومعرفة المزيد من المعلومات عن خصائصه.

قطاعات هيجز

بناءً على ما سبق، نتوقَّع العثور على بوزون هيجز قريبًا. نظريًّا، يمكن أن ينتج هذا البوزون أثناء التشغيل الأولي لمصادم الهادرونات الكبير بنصف مقدار الطاقة المستهدفة؛ لأن هذا المقدار يفوق ما يكفي لإنتاج هذا البوزون، لكننا رأينا أيضًا أن بوزون هيجز سينتج عن تصادمات البروتونات في نسبة صغيرة من الوقت فقط، ومعنى ذلك أن جسيمات هيجز لن تنتج إلا عندما يكون هناك الكثير من تصادمات البروتونات؛ ما يعني الحاجة إلى مستوًى عالٍ من السطوع. والعدد الأصلي للتصادمات، الذي تحدَّد قبل إغلاق مصادم الهادرونات الكبير عامًا ونصف عام لإعداده للعمل بالطاقة المستهدفة له، كان أقل كثيرًا مما يكفي لإنتاج بوزونات هيجز يمكن رؤيتها، لكن الخطة المُعَدَّة لتشغيل مصادم الهادرونات الكبير في عام ٢٠١٢ قبل إغلاقه لمدة عام، قد تسمح بالوصول إلى بوزون هيجز المحيِّر. ولا شك أنه عند تشغيل المصادم بكامل قدرته، سيكون السطوع عاليًا بما فيه الكفاية، وسيكون البحث عن بوزون هيجز أحد أهدافه الرئيسية.

قد يبدو البحث مضيعة للوقت إذا كنَّا واثقين تمامًا من وجود بوزون هيجز (وإذا كان سبيل البحث شديد الصعوبة)، لكن الأمر جدير ببذل الجهد لأسباب عدة، لعل أهمها هو أن التنبؤات النظرية لا تحقِّق لنا أي قدر إضافي من التقدُّم. وأغلب الناس — ولهم الحق في ذلك — لا يثقون ولا يؤمنون إلا بالنتائج العلمية التي أثبتَتِ الملاحظاتُ صحَتَّها، وبوزون هيجز جسيم مختلف تمامًا عن أي شيء آخَر اكتُشِف من قبلُ، وسيكون «الكمية غير الموجهة» الأساسية الوحيدة التي رُصِدت حتى الآن. وعلى عكس الجسيمات مثل الكواركات والبوزونات المقياسية، الكميات غير الموجهة — وهي جسيمات لا تدور — تظل كما هي عندما تدير النظام أو تعزِّزه. والجسيمات الوحيدة التي لا تدور ورُصِدت

حتى الآن هي حالات مرتبطة لجسيمات مثل الكواركات، التي لا تدور بالفعل، ولن نتيَقَّنَ من وجود كمية هيجز غير الموجهة إلا عندما تظهر وتخلِّف أثرًا مرئيًّا في أحد الكواشف.

ثانيًا، حتى إذا اكتشفنا بوزون هيجز وتيَقَّنَّا من وجوده — بل حين نفعل ذلك — فسنظل بحاجة لمعرفة خصائصه. أهم هذه الخصائص المجهولة هي الكتلة، لكن معرفة عمليات تحلُّل البوزون مهمة أيضًا؛ فنحن نعلم ما نتوقَّعه، لكننا بحاجة لقياس مدى توافُق البيانات مع هذه التوقعات. وسيوضِّح لنا ذلك ما إذا كانت نظريتنا البسيطة عن مجال هيجز صحيحة أم إنها جزء من نظرية أكثر تعقيدًا. وبقياس خصائص بوزون هيجز، سوف نتمكَّن من التعمُّق أكثر فيما قد يكمن خارج نطاق النموذج القياسي.

على سبيل المثال، إذا كان هناك مجالان من مجالات هيجز مسئولان عن كسر التناظر الكهروضعيف بدلًا من مجال واحد، فيمكن أن يغيِّر ذلك من تفاعلات بوزون هيجز التي سترصد تغييرًا كبيرًا. وفي النماذج البديلة، يمكن أن يختلف معدل إنتاج بوزون هيجز عمَّا هو متوقع. وفي حال وجود جسيمات أخرى مشحونة تحت تأثير قوى النموذج القياسي، يمكن أن تؤثِّر على معدلات التحلُّل النسبية لبوزون هيجز إلى النواتج النهائية الممكنة.

ينقلنا ذلك إلى السبب الثالث الذي يدفعنا لدراسة بوزون هيجز؛ أَلَا وهو أننا لم نعرف بعدُ ما يطبق آلية هيجز حقًّا. يوضِّح لنا أبسط نموذج — الذي ركَّزنا عليه في هذا الفصل حتى الآن — أن النتيجة التي ستُسفِر عنها التجارب ستكون بوزون هيجز واحدًا، لكن على الرغم من أننا نؤمن بأن آلية هيجز هي المسئولة عن كتل الجسيمات الأولية، فلسنا على يقين بعدُ بشأن مجموعة الجسيمات المحدَّدة التي تدخل في تطبيقها. فمعظم الناس لا يزالون يعتقدون بأننا سنجد على الأرجح بوزون هيجز خفيف الوزن، وإن حدث ذلك، فسيؤكِّد ذلك على تلك الفكرة المهمة.

لكن النماذج البديلة تتضمن قطاعات هيجز أكثر تعقيدًا؛ حيث تتضمَّن مجموعة أكبر من التنبؤات. على سبيل المثال، نماذج التناظر الفائق — التي سنتناولها بمزيد من التفصيل في الفصل التالي — تتنبَّأ بوجود مزيد من الجسيمات في قطاع هيجز، لكننا سنظل نتوقَّع العثور على بوزون هيجز، وإن اختلفت تفاعلاته عن النموذج الذي يحتوي على جسيم هيجز واحد. وفوق كل ذلك، يمكن للجسيمات الأخرى الموجودة في قطاع هيجز أن تقدِّم علامات مثيرة بنفسها إذا كانت خفيفة بالقدر الكافي الذي يسمح بإنتاجها.

وتشير بعض النماذج أيضًا إلى أن كمية هيجز غيرَ الموجهةِ الأساسيةَ غيرُ موجودة، وأن آلية هيجز يطبقها جسيم أكثر تعقيدًا لكنه ليس أساسيًّا، وإنما هو عبارة عن حالة مرتبطة من جسيمات أولية تشبه الإلكترونات المزدوجة التي تمنح الفوتون كتلته في المادة الفائقة التوصيل. إذا كان هذا هو الحال، فإن الحالة المرتبطة لجسيم هيجز ينبغي أن تكون ثقيلةً للغاية، ولها خصائص تفاعُل أخرى تميِّزها عن بوزون هيجز الأساسي. هذه النماذج غير مدعومة حاليًّا؛ لأنها من الصعب أن تتماشَى مع الملاحظات التجريبية. ومع ذلك، فإن تجارب مصادم الهادرونات الكبير ستجري الأبحاث للتأكُّد من ذلك.

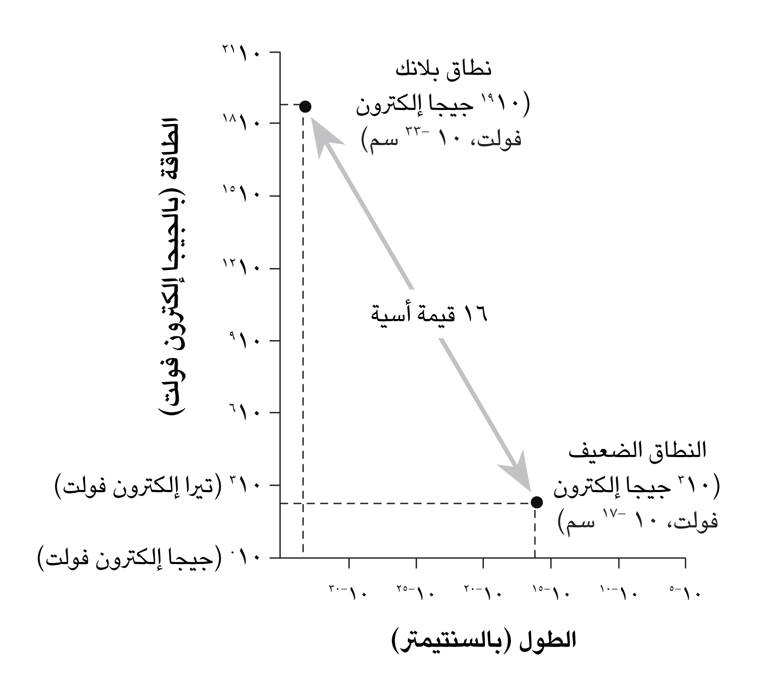
مشكلة التسلسل الهرمي في فيزياء الجسيمات

إن اكتشاف بوزون هيجز ليس سوى جانب بسيط للغاية مما يمكن أن يتوصَّل إليه مصادم الهادرونات الكبير. وبالرغم من مدى الإثارة التي ينطوي عليها اكتشاف بوزون هيجز، فإنه ليس الهدف الوحيد لأبحاث مصادم الهادرونات الكبير التجريبية، ولعل السبب الرئيس لدراسة النطاق الضعيف هو اعتقاد الجميع بأن بوزون هيجز ليس الشيء الوحيد الذي يمكن العثور عليه. فيتوقَّع الفيزيائيون ألَّا يكون هذا البوزون سوى عنصر واحد فقط لنموذج أكثر ثراءً يمكن أن يقدِّم لنا المزيدَ من المعلومات عن طبيعة المادة، بل ربما عن الفضاء أيضًا.

يرجع السبب في ذلك إلى أن بوزون هيجز — ولا شيء غيره — يؤدِّي إلى معضلة أخرى تُسمَّى «مشكلة التسلسل الهرمي». تتعلق هذه المشكلة بالسؤال التالي: لماذا تمتلك كتل الجسيمات — لا سيما كتلة هيجز — القِيَم التي هي عليها تحديدًا؟ ونطاق الكتلة الضعيفة الذي يحدِّد كتل الجسيمات الأولية أصغر بمقدار عشرة آلاف تريليون مرة من نطاق كتل آخَر، وهو نطاق كتلة بلانك الذي يحدِّد مدى قوة تفاعلات الجاذبية (انظر الشكل ١٦-٤).

وضخامة كتلة بلانك مقارنةً بالكتلة الضعيفة تتناسَب مع ضعف الجاذبية. فالعلاقة بين تفاعلات الجاذبية وكتلة بلانك علاقة عكسية، بمعنى أنه إذا كانت هذه الكتلة بالحجم الكبير الذي نعرفه، فلا بد أن تكون الجاذبية ضعيفة للغاية.

الحقيقة أن الجاذبية، من الناحية الجوهرية، هي القوة الأضعف على الإطلاق وفق ما هو معروف حتى الآن. قد لا يبدو هذا الضعف واضحًا، وذلك يرجع إلى أن الكتلة الكاملة للأرض تجذبك إليها، لكنك إذا نظرت إلى قوة الجاذبية بين إلكترونين، فسوف



شكل ١٦-٤: مشكلة التسلسل الهرمي بفيزياء الجسيمات: نطاق الطاقة الضعيفة يقل بقيمة ١٦ قيمة أُسِّيَّة عن نطاق بلانك المرتبط بالجاذبية، ونطاق طول بلانك أقل بدوره من المسافات التي يصل إليها مصادم الهادرونات الكبير.

تجد أن القوة الكهرومغناطيسية أكبر من الجاذبية بمقدار ٤٣ قيمة أُسِّيَّة، ومعنى ذلك أن القوة الكهرومغناطيسية تزيد بنحو ١٠ ملايين تريليون تريليون تريليون مرة عن قوة الجاذبية، وبذلك فإن قيمة الجاذبية التي تؤثِّر على الجسيمات الأولية مهملة تمامًا. بناءً على هذا المنطق، تكمن مشكلة التسلسل الهرمي في السؤال التالي: ما السبب وراء كون الجاذبية أضعف بكثير من القوى الأولية الأخرى التي نعرفها؟

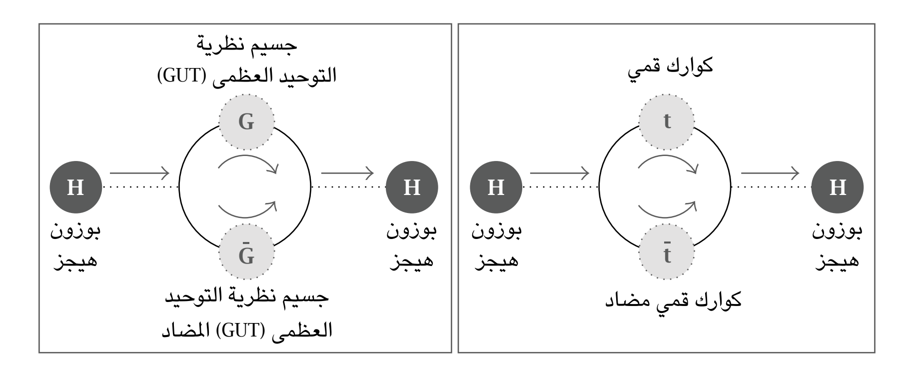
لا يحب فيزيائيو الجسيمات الأرقام الكبيرة غير المفسَّرة، مثل حجم كتلة بلانك مقارنةً بالكتلة الضعيفة، لكن المشكلة تفوق كونها اعتراضًا جماليًّا على الأعداد الكبيرة الغامضة. فوَفْق نظرية المجال الكمي — التي تشمل ميكانيكا الكم والنسبية الخاصة —

من المفترض ألَّا يكون هناك تناقض على الإطلاق بين الكتلتين. وأهمية مشكلة التسلسل الهرمي، على الأقل للفيزيائيين النظريين، يمكن استيعابها بشكل كامل في هذا السياق، فتشير نظرية المجال الكمي إلى أن ثابت كتلة بلانك والكتلة الضعيفة يجب أن يكونا متماثلين.

في نظرية المجال الكمي، تلعب كتلة بلانك دورًا مهمًّا، ليس فقط لأنها النطاق الذي تكون فيه الجاذبية قوية، وإنما أيضًا لأنها الكتلة التي تكون فيها الجاذبية وميكانيكا الكم ضروريتين، ويتم الإخلال فيها بقواعد الفيزياء كما نعرفها. لكننا نعلم بالفعل كيف نجري حسابات فيزياء الجسيمات عند الطاقات المنخفضة باستخدام نظرية المجال الكمي التي تقوم على أساسها تنبؤاتٌ عديدة ناجحة، تنبؤات يقتنع من خلالها الفيزيائيون بأن هذه النظرية صحيحة. في الواقع، أفضل الأرقام المقيسة في جميع العلوم تتوافَق مع التنبؤات القائمة على نظرية المجال الكمي، وهذا التوافق ليس مصادفة.

بَيْدَ أن نتيجة تطبيق مبادئ مشابهة عند محاولة دمج مساهمات ميكانيكا الكم في كتلة هيجز بواسطة الجسيمات الافتراضية نتيجةٌ محيِّرَة للغاية؛ فيبدو أن المساهمات الافتراضية من أي جسيم في النظرية تمنح جسيم هيجز كتلة بحجم كتلة بلانك. يمكن أن تكون الجسيمات الوسيطة أجسامًا ثقيلة، مثل الجسيمات التي تحمل كُتَل نطاق نظرية التوحيد العظمى الضخمة (انظر الصورة الموجودة على اليسار بالشكل ١٦-٥)، أو يمكن أن تكون جسيمات نموذج قياسي عادية، مثل الكواركات القمية (انظر الصورة الموجودة على اليمين). وفي الحالتين، التصحيحات الافتراضية ستجعل كتلة هيجز كبيرةً للغاية، لكن المشكلة تكمن في أن الطاقات المسموح بها للجسيمات الافتراضية المُتبادَلة يمكن أن تكون كبيرة بحجم طاقة بلانك. وعندما يحدث ذلك، يمكن لمساهمة كتلة هيجز أيضًا أن تكون بهذا الحجم الكبير تقريبًا، وفي هذه الحالة سيكون نطاق الكتلة، الذي ينكسر فيه التناظر المرتبط بالتفاعلات الضعيفة تلقائيًّا، هو نطاق طاقة بلانك الذي يزيد بمقدار ١٦ قيمة أُسِّيَّة؛ أي عشرة آلاف تريليون مرة.

إن مشكلة التسلسل الهرمي من المشاكل المهمة في النموذج القياسي الذي يحتوي على بوزون هيجز واحد فقط. لكن من الناحية الفنية، يوجد مهرب من هذه المشكلة؛ فكتلة بوزون هيجز — في غياب المساهمات الافتراضية — يمكن أن تكون ضخمة، ويمكن أن تكون لها القيمة ذاتها التي تلغي المساهمات الافتراضية لتصل إلى مستوى الدقة الذي نرغب فيه فحسب، لكن المشكلة هي أنه بالرغم من أن ذلك ممكن نظريًّا، فإنه يعني إلغاء ١٦ رقمًا عشريًّا، الأمر الذي سيكون بمنزلة مصادفة بحتة.



شكل ١٦-٥: يوضِّح هذا الشكل المساهمة الكمية في كتلة بوزون هيجز من جسيم ثقيل — مثل كتل نطاق نظرية التوحيد العظمى — والجسيم المضاد له (على اليسار) ومن كوارك قمي افتراضي والجسيم المضاد له (على اليمين).

لا يؤمن أي فيزيائي بهذا الهراء، أو التلاعب كما نطلق عليه؛ فجمعينا نؤمن بأن مشكلة التسلسل الهرمي — في ظل معرفة التناقض بين هذه الكتل — علامة على شيء ما أكبر وأفضل في النظرية الأساسية. يبدو أنه لا يوجد نموذج بسيط يتناول المشكلة بالكامل. والإجابات الواعدة الوحيدة التي لدينا تتضمن توسيعات لنطاق النموذج القياسي، مع إضافة بعض الملامح المهمة. وسيكون حل مشكلة التسلسل الهرمي، إلى جانب معرفة الجسيم أو الجسيمات التي تطبق آلية هيجز أيًّا كانت، هو الهدف البحثي الرئيسي في مصادم الهادرونات الكبير، وموضوع الفصل التالي.

الفصل السابع عشر

أفضل النماذج المحتملة

في يناير ٢٠١٠، اجتمع زملائي بأحد المؤتمرات المنعقدة آنذاك في جنوب كاليفورنيا لمناقشة أبحاث فيزياء الجسيمات والمادة المظلمة في عصر مصادم الهادرونات الكبير. طلبت مني مُنظِّمة المؤتمر ماريا سبيروبولو — وهي إحدى أعضاء فريق الفيزيائيين التجريبيين بتجربة اللولب المركب للميوونات، وعضو قسم الفيزياء بمعهد كاليفورنيا للتقنية (كالتيك) — أن أكون أول المتحدثين، وأن أعرض القضايا الأساسية لمصادم الهادرونات الكبير والأهداف الفيزيائية المراد تحقيقها في المستقبل القريب.

أرادت ماريا إضفاء الإثارة على المؤتمر؛ لذا اقترحت أن نبدأ المؤتمر بمبارزة بين المتحدثين الثلاثة الافتتاحيين. وما زاد الأمر صعوبةً الجمهور المدعو للمؤتمر؛ إذ فرضوا تحديًّا عظيمًا؛ نظرًا لتنوُّعهم ما بين الخبراء في المجال والملاحظين المهتمين بالموضوع من جميع مجالات التكنولوجيا في كاليفورنيا. طلبت مني ماريا التعمُّق وتناول الملامح الدقيقة التي يُغفَل عنها عادةً في النظريات والتجارب الحالية، في حين اقترح أحد الحاضرين ويُدعَى داني هيليز — وهو شخص عبقري غير متخصِّص في الفيزياء يعمل بشركة «آبلايد مايندس» — أن أبسِّط الأمور قدر الإمكان حتى يتمكَّن غير الخبراء بين الحضور من استيعابها.

فما كان مني إلا أن فعلتُ ما يمكن أن يفعله أي شخص عاقل في مواجهة هذه النصائح المتناقضة التي يستحيل تنفيذها؛ أَلَا وهو المماطلة. كانت أول شريحة في عرض الشرائح الذي قدَّمْتُه هي نتيجة بحثي على الإنترنت (انظر الشكل ١٧-١) الذي انتهى به المطاف إلى مقال لدينيس أوفرباي بصحيفة «نيويورك تايمز» تناوَلَ هذا الموضوع، بكل ما فيه من أخطاء مطبعية وما إلى ذلك.



شكل ١٧-١: النماذج المُقترَحة مثلما عرضْتُها على إحدى الشرائح بالمؤتمر.

أشارت نقاط هذا المقال للموضوع الأساسي الذي كان من المقرر لي وللمتحدث التالي لي تغطيته، لكن المؤثرات الصوتية الهزلية التي أرفقتُها مع دخول كلٍّ من القطط المتبارزة (لا يمكنني التعبير عنها هنا كتابةً) كان الهدف منها أن تعكس كلٍّ من الحماس والشك المرتبطين بكل نموذج من هذه النماذج. فجميع الحضور بالمؤتمر — بغض النظر عن مدى اقتناعهم القوي بالفكرة التي يعملون عليها — يعلمون أن هناك بيانات ستظهر قريبًا، وهذه البيانات سيكون لها الحكم النهائي بشأن مَن سيضحك أخيرًا (أو مَن سيفوز بجائزة نوبل).

يتيح لنا مصادم الهادرونات الكبير فرصةً فريدة للفهم الجيد وتكوين معرفة جديدة، ويأمل فيزيائيو الجسيمات أن يعرفوا قريبًا إجابات الأسئلة العميقة التي طالما فكَّروا فيها بشأن: لماذا تملك الجسيمات الكتل التي تملكها؟ ممَّ تتألَّف المادة المظلمة؟ هل تحلُّ الأبعادُ الإضافية مشكلةَ التسلسل الهرمي؟ هل تشترك التناظرات الإضافية للزمكان في ذلك؟ أم هل ثمة شيء غير مرئي تمامًا يلعب دورًا في ذلك؟

تشمل الإجابات المقترَحة نماذج تحمل أسماء من قبيل التناظُر الفائق، والنموذج الملون، والأبعاد الإضافية. ويمكن أن تكون الإجابات مختلفة عن أي شيء متوقَّع، لكن النماذج تقدِّم لنا أهدافًا محدَّدة لما علينا البحث عنه. يستعرض هذا الفصل بعضًا من النماذج المُقترَحة التي تتناول مشكلة التسلسل الهرمي، ويقدِّم لمحة عن عمليات الاستكشاف التي سيجريها مصادم الهادرونات الكبير. تجري الأبحاث عن هذه النماذج وغيرها على نحو متزامن، ومن شأنها تقديم معلومات دقيقة قيِّمة لنا بغضِّ النظر عمَّا سيَثبت في النهاية أنه النظرية الحقيقية للطبيعة.

التناظر الفائق

سنبدأ حديثنا هنا بذلك النوع الغريب من التناظر المعروف بالتناظر الفائق، والنماذج التي يشملها. إذا أجريْتَ استطلاعًا للآراء بين فيزيائيي الجسيمات، فستجد نسبةً كبيرةً منهم تقول بأن التناظر الفائق يحل مشكلة التسلسل الهرمي. وإذا سألت الفيزيائيين التجريبيين عمَّا أرادوا البحث عنه، فسيشير عدد كبير منهم إلى التناظر الفائق أيضًا.

منذ سبعينيات القرن العشرين، اعتبر الكثيرون من الفيزيائيين وجود نظريات التناظر الفائق أمرًا مذهلًا وجميلًا، ما جعلهم يؤمنون بحتمية وجود هذا التناظر في الطبيعة. قدَّر هؤلاء العلماء أيضًا بالحسابات أن القوى ينبغي أن يكون لها نفس شدة الطاقة العالية في نموذج التناظر الفائق، لتحسن بذلك من التقارب الشديد الذي يحدث في النموذج القياسي، وتسمح بإمكانية التوحيد. يرى الكثير من الفيزيائيين النظريين أيضًا في التناظر الفائق الحلَّ الأكثر إثارةً لمشكلة التسلسل الهرمي، رغم صعوبة جعل كل التفاصيل تتوافَق مع ما نعرفه.

تفترض النماذج الفائقة التناظُر أن كلَّ جسيم أساسي بالنموذج القياسي — كالإلكترونات، والكواركات، وما إلى ذلك — له شريك في صورة جسيم يُجري تفاعلات مماثلة، لكنه يختلف في الخصائص الميكانيكية الكمية. وإذا كان العالَمُ فائقَ التناظر،

فمعنى ذلك أنه يوجد العديد من الجسيمات غير المعروفة التي يمكن اكتشافها قريبًا؛ هذه الجسيمات هي شركاء التناظر الفائق لكل جسيم معروف (انظر الشكل ١٧-٢).

شركاء التناظر الفائق

لبتونات فائقة		كواركات فائقة	
$\tilde{e}$ إلكترون فائق	$\tilde{\nu}_1$ نيوترينو فائق	$\tilde{d}$ كوارك سفلي فائق	$\tilde{u}$ كوارك علوي فائق
$\tilde{\mu}$ ميوون فائق	$\tilde{\nu}_2$ نيوترينو فائق	$\tilde{s}$ كوارك غريب فائق	$\tilde{c}$ كوارك ساحر فائق
$\tilde{\tau}$ تاوون فائق	$\tilde{\nu}_3$ نيوترينو فائق	$\tilde{b}$ كوارك قاعي فائق	$\tilde{t}$ كوارك قمي فائق
وينوات، هيجزينوات، شارجينوات			
X^+_1	X^-_1	X^+_2	X^-_2
هيجزينوات، نيوترالينوات			
$\tilde{X}^0_1$	$\tilde{X}^0_2$	$\tilde{X}^0_3$	$\tilde{X}^0_4$
جلووينوات			
$\tilde{g}$			

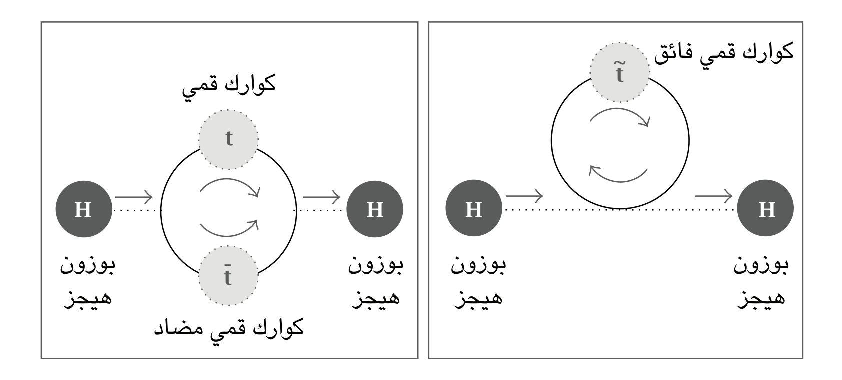
جسيمات النموذج القياسي

لبتونات		كواركات	
e إلكترون	ν_1 أخف نيوترينو	d كوارك سفلي	u كوارك علوي
μ ميوون	ν_2 نيوترينو متوسط	s كوارك غريب	c كوارك ساحر
τ تاوون	ν_3 أثقل نيوترينو	b كوارك قاعي	t كوارك قمي
البوزونات المقياسية الكهروضعيفة			
W^+	W^-	Z	γ
بوزونات هيجز			
H	A	H^0	$H^\pm$
جلوونات			
g			

شكل ١٧-٢: في نظرية التناظر الفائق، كل جسيم بالنموذج القياسي له شريك فائق التناظر. وقطاع هيجز هنا أكثر تطورًا من قطاع النموذج القياسي.

ونماذج التناظر الفائق من شأنها المساعدة في حلِّ مشكلة التسلسل الهرمي. وإن فعلت، فسيكون ذلك على نحو مميز. في النموذج الفائق التناظر تمامًا، الإسهامات

الافتراضية للجسيمات والجسيمات الفائقة الشريكة لها تلغي بعضها البعض تمامًا. بعبارة أخرى، إذا أضفت جميع الإسهامات الميكانيكية الكمية من كل جسيم في النموذج الفائق التناظر، ودوَّنْتَ أثرها على كتلة بوزون هيجز، فسوف تجد حاصل جمعها كلها صفرًا. وفي النموذج الفائق التناظر، يكون بوزون هيجز بلا كتلة أو خفيفًا، حتى في وجود التصحيحات الافتراضية الميكانيكية الكمية. وفي نظرية التناظر الفائق الصحيحة، يلغي مجموع الإسهامات لكلا النوعين من الجسيمات بعضه بعضًا (انظر الشكل ١٧-٣).



شكل ١٧-٣: في نموذج التناظر الفائق، إسهامات جسيمات التناظر الفائق الافتراضية تلغي إسهامات جسيمات النموذج القياسي في كتلة بوزون هيجز. على سبيل المثال، مجموع الإسهامات من الرسمين الموضحين أعلاه يساوي صفرًا.

لعل ذلك يبدو إعجازيًّا، لكنه مضمون؛ لأن التناظر الفائق نوع خاص للغاية من التناظر. إنه تناظُر المكان والزمان — شأنه شأن التناظرات التي نَأْلفها جميعًا، مثل عمليات الدوران والترجمة — لكنه يمتدُّ إلى النظام الكمي.

تقسم ميكانيكا الكم المادة إلى فئتين مختلفتين؛ أَلَا وهما البوزونات والفرميونات. الفرميونات هي جسيمات لها لف مغزلي نصفي، ورقم اللف المغزلي يوضِّح أمورًا معينة؛ مثل: إلى أي مدًى يتصرَّف الجسيم كما لو كان يدور. واللف المغزلي النصفي يعني قيمًا مثل ١ / ٢، و٣ / ٢، و٥ / ٢. الكواركات واللبتونات في النموذج القياسي أمثلة على الفرميونات، ولها لف مغزلي قدره ١- / ٢. على الجانب الآخَر، للبوزونات — وهي

جسيمات مثل البوزونات المقياسية الحاملة للقوة أو بوزون هيجز الذي لم يُكتشَف بعدُ — لف مغزلي صحيح يُشَار إليه بالأرقام الكاملة، مثل صفر و١ و٢ وما إلى ذلك.

لا يقتصر ما يميِّز الفرميونات عن البوزونات على ما لهذه الجسيمات من لف مغزلي فحسب، وإنما تختلف كذلك في سلوكها اختلافًا هائلًا عند وجود اثنين أو أكثر من نفس النوع في آنٍ واحد. على سبيل المثال، الفرميونات المتطابقة التي تحمل نفس الصفات لا يمكن أن يتزامن وجودها معًا في نفس المكان. هذا ما ينصُّ عليه «مبدأ الاستبعاد لباولي»، المُسمَّى بهذا الاسم نسبةً للفيزيائي النمساوي الجنسية فولفجانج باولي. وهذه الحقيقة المتعلقة بالفرميونات هي السبب وراء بنية الجدول الدوري التي توضِّح لنا أن الإلكترونات — إذا لم يكن هناك رقم كمي معين يميِّزها — لا بد أن تدور حول النواة على نحوٍ مختلف عن بعضها البعض. وهي السبب أيضًا وراء عدم سقوط الكرسي الذي أجلس عليه الآن إلى مركز الكرة الأرضية؛ لأن الفرميونات الموجودة في الكرسي لا يمكن أن تتواجد في نفس المكان الذي توجد فيه المادة المصنوعة منها الأرض.

على الجانب الآخَر، تتصرف البوزونات على نحوٍ مخالِفٍ كليةً؛ فيزيد احتمال تواجُدها في نفس المكان على نحو متزامِن. ومن شأنها التكدس بعضها فوق بعض — كالتماسيح — ولهذا توجد بعض الظواهر، مثل «تكاثف بوز»، التي تتطلب تكدُّس الكثير من الجسيمات في الحالة الميكانيكية الكمية نفسها. يعتمد الليزر أيضًا على ارتباط الفوتونات البوزونية بعضها ببعض. وتتكون الحزمة الليزرية الكثيفة بواسطة عدد كبير من الفوتونات المتطابقة التي تنطلق جميعها معًا.

اللافت للنظر أنه في النموذج الفائق التناظر، الجسيمات التي نعتبرها مختلفةً للغاية — البوزونات والفرميونات — يمكن تبادُلها على نحو يؤدِّي في النهاية إلى النتيجة ذاتها مثل النظرية التي بدأنا بها. فكل جسيم يكون له جسيم قرين من النوع الميكانيكي الكمي المضاد، لكنه يحمل الكتلة والشحنة ذاتها. وأسماء الجسيمات الجديدة مضحكة بعض الشيء، وتثير دومًا الضحك بين أي جمهور أتحدَّث إليه عن هذا الموضوع. على سبيل المثال، الإلكترون الفرميوني يقترن بإلكترون فائق بوزوني، والفوتون البوزوني يقترن بفوتونيو فرميوني، وبوزون W يقترن بجسيم وينو. والجسيمات الجديدة لها تفاعلات مرتبطة بجسيمات النموذج القياسي التي ترتبط بها، لكنها تتناقض في خصائصها الميكانيكية الكمية.

في نظرية التناظر الفائق، ترتبط خصائص كل بوزون بخصائص الفرميون الفائق المقترن به، والعكس بالعكس. وبما أن كل جسيم له قرين والتفاعلات بينهما متوازنة

بدقة، فإن النظرية تسمح بهذا التناظر الغريب الذي يجري فيه تبادل الفرميونات والبوزونات.

يمكن استيعاب الإلغاء، الذي يبدو إعجازيًّا، لإسهامات كتلة هيجز الافتراضية، عن طريق إدراك أن التناظر الفائق يربط أي بوزون بفرميون قرين له. على وجه الخصوص، يتسبَّب التناظر الفائق في اقتران بوزون هيجز بفرميون هيجز المسمَّى هيجزينو. وبالرغم من أن الإسهامات الميكانيكية الكمية تؤثِّر تأثيرًا جذريًّا على كتلة البوزون، فإن كتلة الفرميون لن تكون أكبر بكثير من «الكتلة التقليدية» أبدًا، وهي الكتلة التي كانت موجودة قبل أن تحسب الإسهامات الكمية التي بدأ بها، حتى عند تضمين التصحيحات الميكانيكية الكمية.

المنطق معقَّد، لكن التصحيحات الكبيرة لا تحدث؛ لأنَّ كتل الفرميونات تتضمن جسيمات تدور ناحية اليسار وناحية اليمين، وشروط الكتلة تسمح لها بالتحول إلى بعضها البعض. وإذا لم يوجد شرط للكتل التقليدية، ولم تتحوَّل إلى بعضها البعض قبل تضمين الآثار الافتراضية الميكانيكية الكمية، فلن يمكنها فعل ذلك حتى مع وضع الآثار الميكانيكية الكمية في الاعتبار. وإذا لم يكن للفرميون كتلة من البداية (كتلة تقليدية)، فستظل كتلته تساوي صفرًا بعد تضمين الإسهامات الميكانيكية الكمية.

لا ينطبق ذلك على البوزونات؛ فبوزون هيجز — على سبيل المثال — ليس له لف مغزلي؛ ومن ثَمَّ لا يمكن التحدث عن دوران بوزون هيجز ناحية اليسار أو اليمين. لكن التناظر الفائق يشير إلى أن كتل البوزونات هي نفسها كتل الفرميونات؛ من ثَمَّ إذا كانت كتلة الهيجزينو صفرية (أو كانت صغيرة)، فيجب أن تكون كذلك كتلة بوزون هيجز المقترن به في نظرية التناظر الفائق، حتى عند وضع التصحيحات الميكانيكية الكمية في الاعتبار.

لا نعلم حتى الآن ما إذا كان هذا التفسير الأنيق لاستقرار التسلسل الهرمي وإلغاء التصحيحات الكبيرة لكتلة هيجز صحيحًا أم لا. لكن إذا حلَّ التناظرُ الفائق فعلًا مشكلةَ التسلسل الهرمي، فإننا نعلم من ثَمَّ الكثير عمَّا يمكننا توقُّع الوصول إليه في مصادم الهادرونات الكبير. والسبب في ذلك هو أننا نعلم الجسيمات الجديدة التي من المفترض تواجُدها؛ نظرًا لأن كل جسيم ينبغي أن يكون له جسيم قرين به. وفوق كل ذلك، يمكننا تقدير الكتل التي من المفترض أن تحملها الجسيمات الجديدة الفائقة التناظر.

لا ريب أنه إذا كان التناظر الفائق محفوظًا تمامًا في الطبيعة، فسوف نعلم على وجه التحديد كتل جميع الجسيمات المقترنة الفائقة التناظر، وسوف تكون متطابقة مع

كتل الجسيمات التي تقترن بها. رغم ذلك، لم يُرصَد أيٌّ من الجسيمات المقترنة الفائقة التناظر. يوضح لنا ذلك أنه حتى إذا انطبق التناظر الفائق في الطبيعة، فإنه لا يمكن أن يكون تامًّا. ولو كان كذلك، لَكُنَّا قد اكتشفنا بالفعل الإلكترون الفائق والكوارك الفائق وكل الجسيمات الفائقة التناظر الأخرى التي تتنبَّأ بها نظريةُ التناظر الفائق.

ومن ثَمَّ، لا بد من «كسر» التناظر الفائق؛ بمعنى أن العلاقات التي تتنبَّأ بها نظرية التناظر الفائق — رغم أنها ربما تكون تقريبية — لا يمكن أن تكون تامة. وفي نظرية التناظر الفائق المكسور، يظل لكل جسيم قرين فائق، لكن هذه الجسيمات القرينة الفائقة يكون لها كتل مختلفة عن جسيمات النموذج القياسي التي تقترن بها.

رغم ذلك، إذا كُسِرَ التناظر الفائق على نحو سيئ للغاية، فلن يساعد ذلك في حل مشكلة التسلسل الهرمي؛ لأن العالَم سيبدو آنذاك كما لو أن التناظر الفائق ليس له وجود في الطبيعة من الأساس. يجب أن ينكسر التناظر الفائق بطريقة معينة لم نكتشفها بعدُ، بحيث يتمتَّع بوزون هيجز بالحماية من الإسهامات الميكانيكية الكمية التي تمنحه كتلة كبيرة.

يوضِّح لنا ذلك أن الجسيمات الفائقة التناظر ينبغي أن يكون لها كتل بالنطاق الضعيف، وإذا خفَّ وزنها عن ذلك، فستكون مرئية، وإن زادَ، نتوقع أن تزيد كتلة بوزون هيجز أيضًا. نحن لا نعلم الكتل بالضبط؛ لأننا لا نعرف كتلة بوزون هيجز إلا تقريبيًّا، لكننا نعلم بالفعل أنه إذا كانت الكتل ثقيلة للغاية، فستظل مشكلة التسلسل الهرمي قائمة.

ومن ثَمَّ، فإننا نستنتج أنه إذا كان هناك تناظر فائق في الطبيعة، وكان هو الحل لمشكلة التسلسل الهرمي، فلا بد أن يوجد الكثير من الجسيمات الجديدة التي تتراوح كتلتها بين مئات الجيجا إلكترون فولت وبضعة من التيرا إلكترون فولت، وهذا بالضبط هو نطاق الكتل التي صُمِّم مصادم الهادرونات الكبير للبحث عنها. وهذا المصادم، الذي تبلغ طاقته ١٤ تيرا إلكترون فولت، يجب أن يكون قادرًا على إنتاج هذه الجسيمات، حتى إن دخلت نسبة يسيرة فقط من طاقة البروتونات في تصادم الكواركات والجلوونات معًا وكوَّنت جسيمات جديدة.

أيسر الجسيمات التي يمكن إنتاجها في مصادم الهادرونات الكبير هي الجسيمات الفائقة التناظر التي تُشحَن بفعل القوة النووية القوية. هذه الجسيمات يمكن إنتاجها بوفرة عند تصادم البروتونات (أو على وجه الخصوص الكواركات والجلوونات الموجودة

داخلها). وعند وقوع هذه التصادمات، يمكن إنتاج جسيمات فائقة التناظر جديدة تتفاعل بواسطة القوة القوية، وفي حال حدوث ذلك، ستخلِّف آثارًا مميزة للغاية في الكواشف.

هذه «الآثار» — الأدلة التجريبية التي ستخلِّفها — تعتمد على ما يحدث للجسيم بعد تكوُّنِه. أغلب الجسيمات الفائقة التناظر ستتحلل، يرجع ذلك بوجه عام إلى أن الجسيمات الأخف وزنًا (مثل الموجودة في النموذج القياسي) تتواجد، ويساوي إجمالي شحنتها شحنة الجسيمات الثقيلة الفائقة التناظر. وإن كان هذا هو الحال، فالجسيم الثقيل الفائق التناظر سيتحلل إلى جسيمات النموذج القياسي الأخف وزنًا على نحوٍ يحافظ على الشحنة الأولية له؛ ومن ثَمَّ ستكشف التجارب عن جسيمات النموذج القياسي.

لعل ذلك ليس كافيًا للتعرُّف على التناظر الفائق، لكن في أغلب النماذج الفائقة التناظر، لا يتحلَّل الجسيم الفائق التناظر إلى جسيمات النموذج القياسي فقط، وإنما يظل هناك جسيم آخَر فائق التناظر (أخف وزنًا) في نهاية عملية التحلل. ويرجع ذلك إلى أن الجسيمات الفائقة التناظر لا تظهر (ولا تختفي) إلا في صورة أزواج؛ ومن ثَمَّ لا بد أن يظل جسيم فائق التناظر في النهاية بعد تحلُّل الجسيم الفائق التناظر، فلا يمكن أن يتحوَّل جسيم فائق التناظر إلى لاشيء. بناءً على ذلك، لا بد أن يكون هذا الجسيم الأخف وزنًا مستقرًّا، وهذا الجسيم الأخف وزنًا، الذي لا يتحلل إلى شيء، يسمِّيه الفيزيائيون الجسيم الفائق التناظر الأخف.

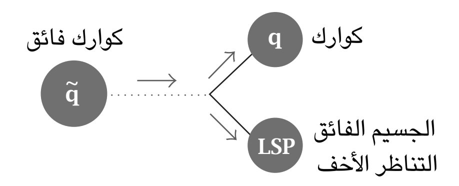
عمليات تحلل الجسيمات الفائقة التناظر متميزة من وجهة النظر التجريبية؛ نظرًا لأن الجسيمات الخفيفة المتعادلة الفائقة التناظر ستظل موجودة، حتى بعد انتهاء التحلل. والقيود الكونية تشير إلى أن الجسيم الفائق التناظر الأخف لا يحمل أي شحنات، ومن ثَمَّ فهو لن يتفاعل مع أي من العناصر في الكواشف. معنى ذلك أنه عند إنتاج أي جسيم فائق التناظر وتحلله، سيبدو أن هناك فَقْدًا في الزخم والطاقة. سيختفي الجسيم الفائق التناظر الأخف من الكاشف وسيحمل معه الزخم والطاقة إلى حيث لا يمكن تسجيلهما، مخلِّفًا وراءه الطاقة المفقودة كأثرٍ دالٍّ عليه. والطاقة المفقودة لا تقتصر على التناظر الفائق فحسب، لكن نظرًا لأننا نعرف بالفعل قدرًا كبيرًا من المعلومات عن النطاق الفائق التناظر، فإننا نعلم ما من المفترض أن نراه وما من المفترض ألَّا نراه.

لنفترض مثلًا أنه جرى إنتاج كوارك فائق التناظر؛ أي القرين فائق التناظر للكوارك. سيعتمد نوع الجسيمات التي سيتحلَّل إليها هذا الكوارك على أي الجسيمات

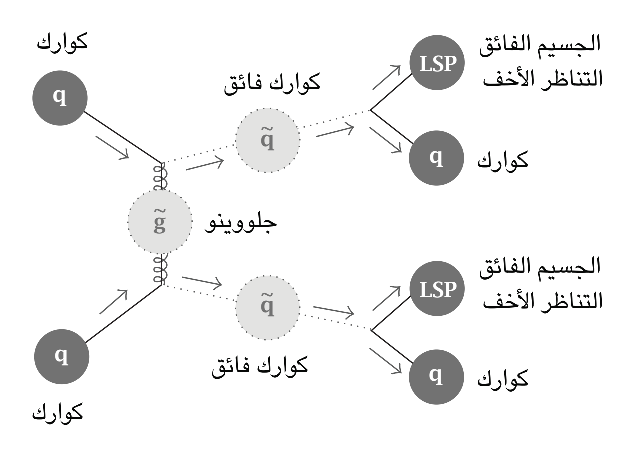
أخف وزنًا. من أنماط التحلل المحتملة لهذا الكوارك الفائق التناظر هو أن يتحلل إلى كوارك والجسيم الفائق التناظر الأخف (انظر الشكل ١٧-٤). جدير بالذكر هنا أنه نظرًا لأن عمليات التحلل يمكن أن تحدث على الفور، لن يسجل الكاشف سوى نواتج التحلل فقط؛ ومن ثَمَّ إذا حدث تحلُّل لمثل هذا الكوارك الفائق التناظر، ستسجل الكواشف مسار الكوارك في متعقب المسار، وفي مِسعَر الهادرونات الذي يقيس مقدار الطاقة التي يرسبها جسيم متفاعل بقوة، لكن التجربة ستقيس كذلك الطاقة والزخم المفقودين. ومن المفترض أن يكون الفيزيائيون التجريبيون قادرين على ملاحظة الزخم المفقود مثلما يمكنهم ملاحظة الزخم المفقود عند إنتاج النيوترينوات، وحين يقيسون الزخم العمودي على الحزمة، سيتوصَّلون إلى أن مجموعه لا يساوي صفرًا. أحد أكبر التحديات التي يواجهها الفيزيائيون التجريبيون هي التعرُّف بوضوح على الزخم المفقود هذا؛ ففي النهاية، أي شيء لا يُكشَف عنه يبدو مفقودًا. وإن سار شيء ما أو قيس على نحو خاطئ، أو في حال إغفال اكتشاف كميات صغيرة من الطاقة، يمكن أن يحاكي الزخم المفقود ما سيكون عليه الحال عند إنتاج الجسيم الفائق التناظر المفقود، حتى إن لم تحدث بالفعل عملية الإنتاج هذه.

في الواقع، نظرًا لأن الكوارك لا يتكوَّن أبدًا وحده، وإنما يكون دومًا مرتبطًا بجسيم آخَر متفاعل بقوة (مثل كوارك فائق أو كوارك فائق مضاد)، فسيقيس الفيزيائيون التجريبيون دفقين على الأقل (انظر الشكل ١٧-٥ للاطلاع على مثال على ذلك). وإذا تكوَّن كواركان فائقان نتيجة لتصادم بين البروتونات، فسوف ينتج عن ذلك كواركين تسجِّلهما الكواشف. لن يُكشَف عن صافي الطاقة المفقودة والزخم، لكن غيابهما سيُلاحَظ ويقدِّم دليلًا على وجود جسيمات جديدة.

من المزايا الرئيسية للتأخيرات في الجدول الزمني الخاص بمصادم الهادرونات الكبير أن الفيزيائيين التجريبيين أُتيح لهم الوقت اللازم لاستيعاب الكواشف التي يعملون بها استيعابًا كاملًا، فأَجْرَوا لها عمليات معايرة لتكون عمليات القياس دقيقة للغاية منذ أول يوم عمل للمصادم؛ ومن ثَمَّ ينبغي أن تكون قياسات الطاقة المفقودة دقيقة. على الجانب الآخَر، أُتِيح الوقت أمام الفيزيائيين النظريين للتفكير في استراتيجيات بحث بديلة عن النماذج الفائقة التناظر وغيرها من النماذج الأخرى. على سبيل المثال، تمكَّنْتُ بالتعاون مع أحد الفيزيائيين النظريين بكلية ويليام كوليدج يُدعَى ديف تاكر سميث، من التوصُّل إلى وسيلة مختلفة — لكنها ذات صلة — للبحث عن ناتج تحلُّل



شكل ١٧-٤: يمكن للكوارك الفائق أن يتحلل إلى كوارك والجسيم الفائق التناظر الأخف.



شكل ١٧-٥: يمكن أن ينتج مصادم الهادرونات الكبير كواركين فائقين معًا، ويتحلَّل كلاهما إلى كواركات والجسيمات الفائقة التناظر الأخف، مخلِّفَين أثرًا يدل على الطاقة المفقودة.

الكوارك الفائق الذي تناولناه فيما سبق. تعتمد هذه الوسيلة على قياس الطاقة والزخم فقط للكواركات الناتجة عن هذا الحدث، دون الحاجة لقياس الزخم المفقود الذي قد يكون مخادعًا. العظيم في قدر الإثارة التي أحاطت بمصادم الهادرونات الكبير مؤخرًا أن عددًا من الفيزيائيين التجريبيين بتجربة اللولب المركب للميوونات قد تبَنَّوا الفكرة على الفور، ولم يُثْبِتوا فقط نجاحها، وإنما أيضًا عمَّموها وحسَّنوها في غضون بضعة أشهر فحسب. والآن، صارت هذه الفكرة جزءًا من استراتيجية البحث القياسية عن

التناظر الفائق، كما أن أول بحث عن التناظر الفائق من تجربة اللولب المركب للميوونات استخدم هذه التقنية التي اقترحناها مؤخرًا.[1]

حتى إن اكتُشِف التناظر الفائق، فلن يتوقَّف الفيزيائيون التجريبيون عند ذلك الحد؛ حيث إنهم لن يدخروا جهدًا لتحديد نطاق التناظر الفائق بالكامل، في حين سيعمل الفيزيائيون النظريون على تفسير ما يمكن أن تعنيه النتائج. ثمة نظريات عديدة مثيرة للاهتمام يقوم عليها التناظر الفائق والجسيمات التي يمكن أن تكسره تلقائيًّا، ونحن نعرف الجسيمات الفائقة التناظر التي من المفترض أن توجد إذا كان التناظر الفائق مرتبطًا بمشكلة التسلسل الهرمي، لكننا لا نعلم حتى الآن على وجه التحديد كُتَلَ هذه الجسميات، أو كيفية ظهورها.

واختلاف أطياف الكتلة يؤدِّي إلى تباين هائل فيما يجب أن يرصده مصادم الهادرونات الكبير. فالجسيمات لا يمكن أن تتحلَّلَ إلا إلى جسيمات أخرى أخف وزنًا، وسلسلة التحلل — أي تتابُع عمليات التحلل الممكنة للجسيمات الفائقة التناظر — تعتمد على الكتل؛ أي ما هو أثقل وما هو أخف وزنًا، ومعدلات حدوث العمليات المختلفة يعتمد أيضًا على كتل الجسيمات. وبوجه عام، الجسيمات الأثقل وزنًا تكون أسرع في تحللها، ويكون من الصعب عادةً إنتاجها؛ لأن التصادمات فقط التي تنطوي على قدر كبير من الطاقة هي التي يمكن أن تنتجها. والجمع بين كل النتائج يمكن أن يمنحنا معلومات دقيقة مهمة عما ينطوي عليه النموذج القياسي، وما ينتظرنا عند نطاقات الطاقة التالية، وهذا ينطبق على أي تحليل للنظريات الفيزيائية الجديدة التي قد نتوصَّل إليها.

ومع ذلك، ينبغي دائمًا أن نتذكَّر أنه بالرغم من شعبية فكرة التناظر الفائق بين الفيزيائيين، فهناك العديد من الأسباب التي تدعو للقلق بشأن ما إذا كان هذا التناظر ينطبق حقًّا على مسألة التسلسل الهرمي والعالم الحقيقي أم لا.

السبب الأول، وربما الأكثر مدعاة للقلق، هو أننا لم نَرَ بعدُ أيَّ أدلة تجريبية على هذا التناظر، وإذا كان موجودًا، يكون التفسير الوحيد لعدم رؤيتنا أي دليل عليه هو أن وزن النظراء الفائقين ثقيل. لكن الحل الطبيعي لمسألة التسلسل الهرمي يستلزم أن يكون وزن النظراء الفائقين خفيف على نحو معقول، فكلما زاد وزن النظراء الفائقين، زادت عدم ملاءمة التناظر الفائق كحلٍّ لمسألة التسلسل الهرمي. والتلاعب اللازم لحل هذا الأمر تحدِّده نسبة كتلة بوزون هيجز إلى مقدار كسر التناظر الفائق. وكلما زادت هذه النسبة، صارت النظرية أكثر «ملاءمة».

وما يزيد المشكلة تعقيدًا أننا لم نَرَ بوزون هيجز بعدُ، وقد اتضح أنه في نموذج التناظر الفائق، السبيل الوحيد لجعل بوزون هيجز ثقيلًا على نحوٍ لا يسمح باكتشافه، هو أن يكون له إسهامات ميكانيكية كمية كبيرة، وهي الإسهامات التي لا يمكن أن تنتج إلا عن نظراء فائقين ثقيلي الوزن، لكن هذه الكتل يجب أن تكون ثقيلة للغاية حتى يصير التسلسل الهرمي غير طبيعي بعض الشيء، حتى في ظل وجود التناظر الفائق.

ومن المشكلات الأخرى المتعلقة بالتناظر الفائق صعوبة العثور على نموذج مُتَّسِق اتساقًا كاملًا يتضمن كسرًا للتناظر الفائق، ويتفق مع كافة البيانات التجريبية التي وصلنا إليها حتى الآن. فالتناظر الفائق نوع شديد التميُّز من التناظر يربط بين العديد من التفاعلات ويمنع تفاعلات أخرى من شأن ميكانيكا الكم أن تسمح بها لولاه، وبمجرد أن ينكسر التناظر الفائق، يسود «المبدأ الفوضوي»؛ بمعنى أن أي شيء يمكن حدوثه سيحدث. ومعظم النماذج تتنبَّأ في هذه الحالة بعمليات تحلُّل إما لم تسبق رؤيتها في الطبيعة أو لم تُرَ كثيرًا على النحو الذي يجعلها تتفق مع التنبؤات. فبسبب ميكانيكا الكم، يظهر عدد هائل من المشكلات بمجرد كسر التناظر الفائق.

لعل الفيزيائيين يعجزون عن رؤية الإجابات الصحيحة فحسب، فلا يسعنا بالتأكيد الجزم بأنه لا توجد نماذج صحيحة أو أنه لا يحدث بعض التلاعب والموالفة. وإذا كان التناظر الفائق هو الحل السليم لمسألة التسلسل الهرمي، فسوف نصل بالتأكيد إلى الأدلة التي تثبت صحته قريبًا في مصادم الهادرونات الكبير؛ ومن ثَمَّ فهو يستحق مواصلة العمل عليه. واكتشاف التناظر الفائق يعني أن هذا التناظر الزمكاني الجديد والغريب لن ينطبق نظريًّا فقط على الورق، وإنما فعليًّا أيضًا على أرض الواقع. أما في حالة عدم اكتشافه، يجدر البحث عن بدائل، وأول هذه البدائل التي سنتناولها هو «النموذج الملون».

النموذج الملون

فكَّرَ الفيزيائيون في سبعينيات القرن العشرين في حلٍّ بديل محتمل لمسألة التسلسل الهرمي، وهو ما يُعرَف باسم «النموذج الملون»، والنماذج التي تندرج تحت هذا المبدأ تشمل الجسيمات التي تتفاعل بقوة بواسطة قوة جديدة أُطلِقَ عليها «قوة النموذج الملون». وكان ما اقترحه العلماء هو أن هذا النموذج الملون يعمل على نحو مشابه للقوة

النووية القوية (المعروفة أيضًا باسم القوة «اللونية» في أوساط الفيزيائيين)، لكنه يربط الجسيمات بعضها ببعض في نطاق القوة الضعيفة، وليس في نطاق كتلة البروتون.

في حال كان النموذج الملون هو الحل المؤكَّد لمسألة التسلسل الهرمي، فلن ينتج مصادم الهادرونات الكبير بوزون هيجز أساسيًّا منفردًا، وإنما سينتج جسيمًا في حالة مرتبطة، مثل الهادرون، والذي سيلعب دور جسيم هيجز. والدليل التجريبي الذي يدعم فكرة النموذج الملوَّن هو وجود العديد من جسيمات الحالة المرتبطة والكثير من التفاعلات القوية في نطاق القوة الضعيفة أو أعلى منها، مثل الهادرونات التي نعرفها، لكنها تظهر عند طاقات أعلى بكثير.

وعدم رؤية أي أدلة بعدُ على ذلك يفرض قيدًا كبيرًا على النموذج الملوَّن، وإذا كان النموذج الملون هو الحل فعلًا لمسألة التسلسل الهرمي، فمن المفترض أننا نملك بالفعل دليلًا عليه، وإن كان لا يزال هناك، بالطبع، شيء ما يغيب عنَّا.

يأتي في مقدمة كل ما سبق أن بناء النماذج باستخدام النموذج الملون أكثر صعوبةً من بنائها باستخدام التناظر الفائق، وقد فرض العثور على نماذج تتفق مع كلِّ ما نلاحظه في الطبيعة تحديات هائلة، ولم يُعثَر على أي نموذج مناسب تمامًا.

رغم ذلك، سيظل ذهن الفيزيائيين التجريبيين متفتحًا، وسيظلون يبحثون عن النموذج الملون وأي دليل آخَر على القوى القوية الجديدة، لكن الآمال في هذا الشأن ليست كبيرة، وإن ثبت أن النموذج الملون هو النظرية الأساسية للعالم، فربما سيتوقف برنامج «مايكروسوفت وورد» عن تصحيح كلمة technicolor تلقائيًّا، ويجعل الحرف الأول منها T كبيرًا كلما أكتبها.

الأبعاد الإضافية

من الواضح أن التناظر الفائق والنموذج الملون ليسا الحل الأمثل لمسألة التسلسل الهرمي؛ فنظريات التناظر الفائق لا تتماشى مع كسر التناظر الفائق الذي يظهر دومًا في التجارب، ولا يقل صعوبة عن ذلك استقاءُ نظريات النموذج الملون، التي تتنبأ بالكتل الصحيحة للبتونات والكواركات؛ لذا قرَّرَ الفيزيائيون النظر إلى ما هو أبعد من ذلك، ودراسة أفكارٍ تبدو من الناحية الظاهرية بدائل تخمينية على نحو أكبر. يجدر التذكر هنا أنه حتى لو بدت الفكرة قبيحةً أو غير واضحةٍ في البداية، لا يمكننا تقرير أي الأفكار هي الأجمل — بل والأهم، أيها الأصح — إلا بعد أن نستوعب جيدًا كل تبعاتها.

وقد أدَّى استيعاب الفيزيائيين مثلًا لنظرية الأوتار ومكوناتها استيعابًا جيدًا في التسعينيات إلى طرح اقتراحات جديدة في التعامل مع مسألة التسلسل الهرمي، كان الدافع وراء هذه الأفكار هو عناصر نظرية الأوتار — وإن كانت لم تُستقَ مباشَرَةً بالضرورة من بنية هذه النظرية المقيدة للغاية — وشملت هذه الأفكار أبعادَ الفضاء الإضافية. في حال وجود هذه الأبعاد — الأمر الذي لدينا من الأسباب ما يجعلنا نؤمن بإمكانية حدوثه — يمكن أن تمكِّننا من حل مشكلة التسلسل الهرمي، وإن كانت موجودة بالفعل، فسوف تنشأ عنها أدلة تجريبية تدل على وجودها في مصادم الهادرونات الكبير.

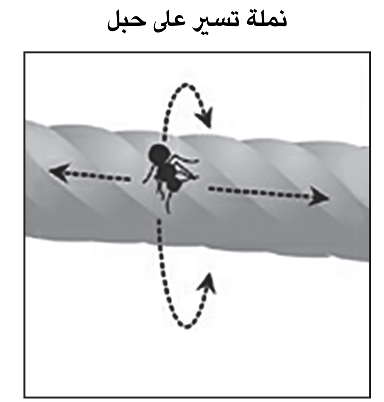
تُعَدُّ أبعاد الفضاء الإضافية مفهومًا غريبًا، فلو كان الكون يحتوي على هذه الأبعاد، لاختلف الفضاء تمامًا عمَّا نلاحظه في حياتنا اليومية، فبالإضافة إلى الأبعاد الثلاثة (يمين ويسار، فوق وتحت، أمام وخلف؛ أو ما نطلق عليه الطول والعرض والارتفاع)، سيمتد الفضاء مع هذه الأبعاد الإضافية في اتجاهات لم يرصدها أحد من قبلُ قطُّ.

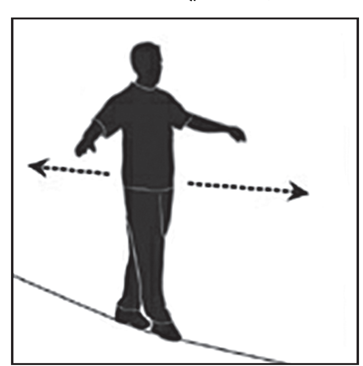
وبما أننا لا نرى هذه الأبعاد الجديدة للفضاء، فهي بالتأكيد خفية، وقد يرجع السبب في ذلك إلى أنها صغيرة للغاية، بما يمنعها من التأثير مباشرةً على أي شيء يمكننا رؤيته؛ وهذا ما اقترحه الفيزيائي أوسكار كلاين في عام ١٩٢٦. وتكمن الفكرة هنا في أنه نظرًا لمحدودية دقة رؤيتنا، يمكن أن تكون هذه الأبعاد أصغر مما يمكننا إبصاره، فمن المستبعد أن نلاحظ بُعدًا مطمورًا لا يمكننا الانتقال عبره، مثلما لا يلاحظ الشخص الذي يسير على الحبل مساره إلا من بُعْد واحد فقط، في حين يمكن أن تلاحظ النملة دقيقة الحجم بعدين للحبل، كما هو موضح في الشكل ١٧-٦.[2]

من الأسباب الأخرى المحتملة لاختفاء الأبعاد الإضافية أن الزمكان منحنٍ أو ملتوٍ، وهو ما علمنا أينشتاين أنه سيحدث في وجود الطاقة. وإذا كان هذا الانحناء كبيرًا بما فيه الكفاية، فستستتر الأبعاد الإضافية، وهذا ما توصَّلْتُ إليه مع رامان ساندرم في عام ١٩٩٩، ومعنى ذلك أن الهندسة الملتوية يمكن أن تقدِّم وسيلةً يتمكَّنُ من خلالها البعد من الاختفاء.[3]

لكن ما الذي يدفعنا للاعتقاد بوجود هذه الأبعاد الإضافية رغم أنه لم تسبق لنا رؤيتها من قبلُ؟ يزخر تاريخ الفيزياء بنماذج لأشياء تم العثور عليها رغم عدم تمكُّن أحد من رؤيتها، فلا يمكن لأحد «رؤية» الذرات أو الكواركات، ومع ذلك تتوفر لدينا أدلة تجريبية قوية على وجود الاثنتين.

ما من قانون فيزيائي ينص على عدم إمكانية وجود أبعاد أخرى للفضاء غير الأبعاد الثلاثة المعروفة، وتسري نظرية النسبية العامة لأينشتاين على أي عدد من الأبعاد.





شكل ١٧-٦: تختلف خبرة الرجل والنملة عند سير كلٍّ منهما على الحبل اختلافًا تامًّا. فيرى الرجل بُعدًا واحدًا فقط، في حين ترى النملة بُعدين.

وبعد فترة قصيرة من إتمام أينشتاين لنظريته عن الجاذبية، توسَّع تيودور كالوتسا في أفكار أينشتاين ليقترح وجود بُعْد رابع للفضاء. وبعد ذلك الحين بخمس سنوات، اقترح أوسكار كلاين كيف يمكن لهذا البعد الرابع أن يكون مطمورًا ومختلفًا عن الأبعاد الثلاثة الأخرى المألوفة.

من ناحية أخرى، تُعَدُّ نظرية الأوتار — وهي المقترح الأساسي لنظريةٍ تجمَعُ بين ميكانيكا الكم والجاذبية — من الأسباب الأخرى التي تدفع الفيزيائيين لتَبَنِّي مفهوم الأبعاد الإضافية حاليًّا. ومن الواضح أن نظرية الأوتار لا تؤدي إلى نظرية الجاذبية التي نعرفها، وهي لا تتضمن بالضرورة أبعاد الفضاء الإضافية.

يسألني الناس كثيرًا عن عدد الأبعاد الموجودة في الكون، والإجابة هي أننا لا نعلم. تقترح نظرية الأوتار وجود ستة أو سبعة أبعاد إضافية، لكن مَن يضعون النماذج يتمتعون دومًا بذهن متفتح، فمن الوارد أن تؤدي الصور المختلفة لنظرية الأوتار إلى احتمالات أخرى. وفي جميع الأحوال، الأبعاد التي يهتم بها واضعو النماذج في المناقشات التالية تقتصر على الأبعاد الملتوية أو الضخمة على نحوٍ يمكنها من التأثير على التنبؤات الفيزيائية. وقد تكون هناك أيضًا أبعاد أصغر من الأبعاد المرتبطة بظواهر فيزياء

الجسيمات، لكننا سنتجاهل أي شيء على هذا القدر من الدقة في الحجم. فنحن نتبع أسلوب النظرية الفعَّالة، ونتجاهَل أي شيء يكون صغيرًا أو غير مرئي على نحو يحول دون إحداثه أي فروق قابلة للقياس.

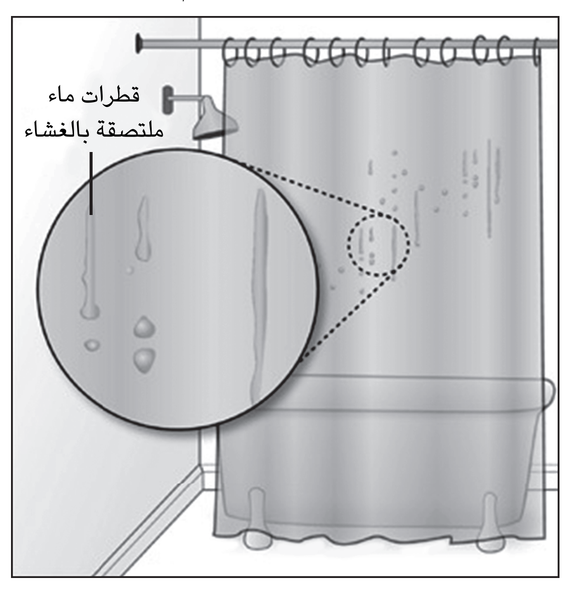
تقدِّم نظرية الأوتار عناصر أخرى أيضًا — لا سيما الأغشية — تطرح عددًا أكبر من الاحتمالات حول هندسة الكون، إذا كان يحتوي بالفعل على أبعاد إضافية. في التسعينيات، برهَنَ عالم نظرية الأوتار جو بولشينسكي على أن هذه النظرية لا تتعلق فقط بالأجسام أحادية البُعْد المسَمَّاة الأوتار، وأثبت بالتعاون مع آخرين، أن الأجسام ذات العدد الأكبر من الأبعاد، والمسماة بالأغشية، تلعب دورًا مهمًّا أيضًا في هذه النظرية.

وكلمة «الغشاء» مستوحاة من الأغشية البيولوجية، وشأن الأغشية البيولوجية التي تمثِّل أسطحًا ثنائية الأبعاد في فضاء ثلاثي الأبعاد، تُعَدُّ هذه الأغشية أسطحًا قليلة الأبعاد في فضاء كثير الأبعاد، وتحجز هذه الأغشية الجسيمات والقوى بداخلها بحيث لا يمكنها الانتقال عبر الفضاء كثير الأبعاد بأكمله، والأغشية في هذا الفضاء الكثير الأبعاد تشبه ستارة الحمام التي تمثِّل سطحًا ثنائي الأبعاد في غرفة ثلاثية الأبعاد (انظر الشكل ١٧-٧). فيمكن لقطرات الماء أن تنتقل على سطح الستارة الثنائي الأبعاد فقط، مثلما يمكن أن تظل الجسيمات والقوى محتجزة على «سطح» الغشاء القليل الأبعاد.

بعبارة أكثر شمولًا، يوجد نوعان من الأوتار: «الأوتار المفتوحة» التي لها أطراف، و«الأوتار المغلقة» التي تكون حلقات تشبه العصابات المطاطية (انظر الشكل ١٧-٨). وقد توصَّلَ علماء نظرية الأوتار في التسعينيات إلى أن أطراف الأوتار المفتوحة لا بد أن تتصل بأغشية، وعندما تنشأ الجسيمات نتيجة لذبذبات الأوتار المفتوحة المثبتة بالغشاء، تُحصَر بدورها في هذا المكان أيضًا، وبذلك تُحجَز الجسيمات — التي تمثِّل ذبذبات هذه الأوتار — هناك. وكما هو الحال مع قطرات الماء على ستارة الحمام، يمكن أن تنتقل هذه الجسيمات في إطار أبعاد الغشاء، لكن دون الابتعاد عنه.

تشير نظرية الأوتار إلى وجود أنواع عديدة من الأغشية، لكن أهم هذه الأنواع للنماذج التي تتناول مسألة التسلسل الهرمي هي الأغشية التي تضم أكثر من ثلاثة أبعاد؛ أي ما يزيد عن الأبعاد الثلاثة المعروفة، فالجسيمات والقوى يمكن أن تُحاصَر على هذه الأغشية، حتى عندما تمتد الجاذبية والفضاء لأبعاد أخرى. (يوضِّح الشكل ١٧-٩ مخططًا لعالم غشائي يظهر فيه شخص ومغناطيس على أحد الأغشية، مع انتشار الجاذبية على الغشاء وخارجه.)

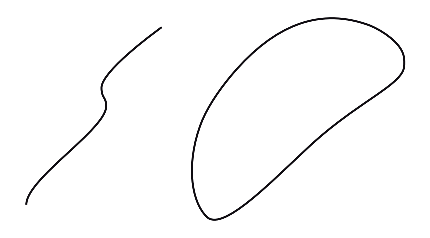




شكل ١٧-٧: يحتجز الغشاء الجسيمات والقوة التي يمكن أن تتحرك داخله دون الخروج منه، شأنه في ذلك شأن قطرات الماء التي يمكن أن تتحرك على ستارة الحمام لكن دون الابتعاد كثيرًا.

يمكن أن يكون للأبعاد الإضافية، التي تنص عليها نظرية الأوتار، دلالة فيزيائية في العالم القابل للرصد، وكذا الأغشية الثلاثية الأبعاد، ولعل أهم أسباب التفكير في الأبعاد الإضافية هو أنها قد تؤثِّر على الظواهر المرئية، لا سيما المعضلات المهمة، مثل مسألة التسلسل الهرمي في فيزياء الجسيمات، فيمكن أن تكون هذه الأبعاد الإضافية والأغشية المفتاح لحل هذه المسألة، من خلال تناولها مسألة أسباب الضعف الشديد للجاذبية.

ينقلنا ذلك إلى ما قد يُعتبَر أهم سبب الآن للتفكير في أبعاد الفضاء الإضافية؛ ألَا وهو أن هذه الأبعاد يمكن أن يكون لها نتائج على الظواهر التي نحاول الآن فهمها؛ ومن ثَمَّ يمكن أن نرى أدلةً عليها في المستقبل القريب.



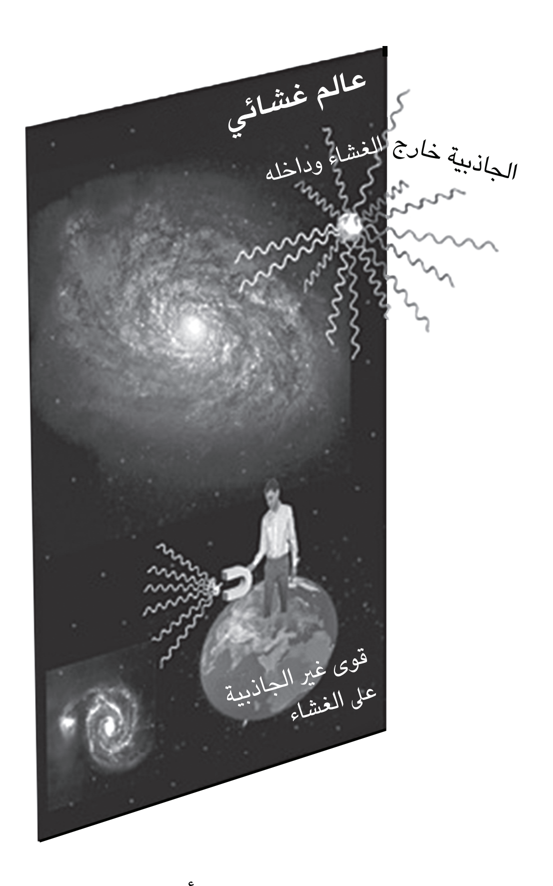
شكل ١٧-٨: وتر مفتوح له طرفان، ووتر مغلق بدون أطراف.

يجدر أن نتذكر هنا أنه يمكننا صياغة مسألة التسلسل الهرمي بأسلوبين مختلفين، فيمكننا أن نقول إنها السؤال: لماذا كتلة هيجز (ومن ثَمَّ النطاق الضعيف) أصغر بكثير من كتلة بلانك؟ وهذا هو السؤال الذي تناولناه عند تفكيرنا في التناظر الفائق والنموذج الملون، لكننا يمكن أن نطرح سؤالًا مماثلًا لذلك، وهو: لماذا الجاذبية ضعيفةٌ مقارَنَةً بالقوى الأساسية الأخرى المعروفة؟ تعتمد قوة الجاذبية على نطاق كتلة بلانك، وهي الكتلة الضخمة التي تزيد عن النطاق الضعيف بعشرة آلاف تريليون مرة، وكلما زاد حجم كتلة بلانك، ضعفت قوة الجاذبية، ولا تقوى الجاذبية إلا عندما تكون الكتل في نطاق بلانك أو بالقرب منه. وطالما أن الجسيمات أخف وزنًا بكثير من نطاق كتلة بلانك، كما هو حالها في عالمنا، تكون الجاذبية ضعيفة للغاية.

ومعضلة سبب ضعف الجاذبية هي، في الواقع، مكافئة لمسألة التسلسل الهرمي، والحل الذي يحل إحدى المعضلتين يحل الأخرى، لكن رغم أن المسألتين متكافئتان، فإن صياغة مسألة التسلسل الهرمي من منظور الجاذبية يساعد في توجيه فكرنا نحو حلول الأبعاد الإضافية، وسوف نتناول الآن بالتفصيل بعض أهم الاقتراحات في هذا الشأن.

الأبعاد الإضافية الكبيرة والتسلسل الهرمي

منذ أن بدأ التفكير في مسألة التسلسل الهرمي للمرة الأولى، اعتقد الفيزيائيون أن الحل لا بد أن يتضمَّن تفاعلات معدلة بين الجسيمات في نطاق من القوة الضعيفة يبلغ حوالي ١ تيرا إلكترون فولت. ومع جسيمات النموذج القياسي فقط، تكون الإسهامات الكمية لكتلة



شكل ١٧-٩: يمكن لجسيمات النموذج القياسي وقواه أن تعلق بالعالم الغشائي الموجود في فضاء كثير الأبعاد. في هذه الحالة سيكون البشر، والمادة، والنجوم التي نعرفها، والقوى مثل القوة الكهرومغناطيسية، والمجرة، والكون بأكمله؛ عبارة عن عناصر تعيش داخل الأبعاد المكانية الثلاث. أما الجاذبية، على الجانب الآخَر، فيمكن أن تنتشر دومًا بجميع أرجاء الفضاء. (الصورة مقدَّمة من مارتي روزنبرج.)

جسيم هيجز ضخمة للغاية، وكان لا بد من تدخُّل شيء ما للتخفيف من الإسهامات الكمية الكبيرة في كتلة جسيم هيجز.

ويُعَدُّ التناظر الفائق والنموذج الملون اثنين من الأمثلة التي قد تشارك من خلالها الجسيمات الجديدة الثقيلة في التفاعلات العالية الطاقة، وتلغي الإسهامات أو تمنع ظهورها من البداية. وجميع الحلول المقترحة لمسألة التسلسل الهرمي — حتى التسعينيات — يمكن إدراجها تحت فئة واحدة؛ حيث تنشأ القوى والجسيمات الدقيقة، بل التناظرات الجديدة أيضًا، في نطاق الطاقة الضعيفة.

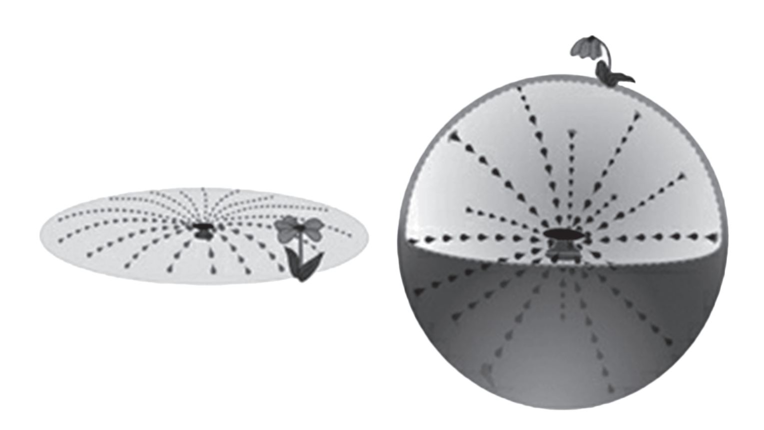
لكن في عام ١٩٩٨، اقترح نيما أركاني حامد، وسافاس ديموبوليس، وجيا دفالي،[4] أسلوبًا بديلًا للتعامل مع هذه المسألة، فأشاروا إلى أنه طالما أن المشكلة لا تتعلق بنطاق القوة الضعيفة فحسب، وإنما أيضًا نسبته إلى نطاق طاقة بلانك المرتبط بالجاذبية، فلعل المشكلة تكمن في الفهم الخاطئ للطبيعة الأساسية للجاذبية نفسها.

واقترحوا أنه ما من تسلسل هرمي، في الواقع، في الكتل على الإطلاق، على الأقل فيما يتعلق بنطاق الجاذبية الأساسي مقارنةً بالنطاق الضعيف. فربما تكون الجاذبية أقوى بكثير في الكون ذي الأبعاد الإضافية، لكن القياسات في عالمنا الرباعي الأبعاد فقط هي التي تشير إلى ضعفها؛ وذلك لأنها مخفَّفة في أرجاء جميع الأبعاد التي لا يمكننا رؤيتها. والفرضية التي وضعها هؤلاء العلماء هي أن نطاق الكتلة الذي تصير فيه الجاذبية قوية في الكون ذي الأبعاد الإضافية؛ هو في الواقع نطاق الكتلة الضعيفة، وفي هذه الحالة، نقيس الجاذبية بأنها ضعيفة في قوتها ليس لأنها ضعيفة في جوهرها، وإنما لانتشارها في أرجاء الأبعاد الكبيرة غير المرئية.

يمكننا استيعاب ذلك بتخيُّل موقف مشابه لرشاش المياه. فكِّر في المياه التي تخرج من هذا الرشاش. إذا انتشرت هذه المياه في الأبعاد التي نعلمها فقط، فإن تأثيرها سيعتمد على كمية المياه الصادرة من الخرطوم، والمسافة التي تقطعها، لكن إذا كانت هناك أبعاد إضافية للفضاء، فسوف ينتشر الماء في جميع أرجاء هذه الأبعاد أيضًا بعد خروجه من طرف الخرطوم، وستكون الكمية التي نرصدها من المياه أقل بكثير مما يمكن أن نرصده من على بُعْد مسافة معينة من المصدر؛ لأن الماء سينتشر أيضًا في جميع أرجاء الأبعاد التي لا نلاحظها (وهذا موضَّح بالرسم التخطيطي في الشكل ١٧-١٠).

إذا كان للأبعاد الإضافية حجمٌ محدودٌ، فسيصل الماء إلى حدود الأبعاد الإضافية ولا يتجاوزها، لكن كمية المياه التي يتلقَّاها أي شيء في أي مكان بالفضاء ذي الأبعاد الإضافية ستكون أقل بكثير مما إذا لم تنتشر المياه في هذه الأبعاد في المقام الأول.

وبالمثل، يمكن أن تنتشر الجاذبية في أبعاد أخرى. وبالرغم من أنها لن تواصِل الانتشارَ للأبد إذا كانت الأبعاد ذات حجم محدود، فإن الأبعاد الكبيرة ستخفِّف من قوة



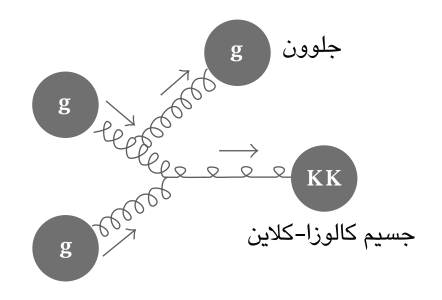
شكل ١٧-١٠: تتراجع شدة القوى بزيادة المسافة في الفضاء الكثير الأبعاد على نحوٍ أسرع من تراجعها في الفضاء القليل الأبعاد، وهذا يشبه ما يحدث مع رذاذ المياه الكثير الأبعاد الذي تتبدَّد منه المياه على نحو أسرع مع تزايد المسافة، فتنتشر المياه في ثلاثة أبعاد بشكل أكبر من انتشارها في بُعْدين. وهذه الصورة توضِّح أن الزهرة التي تتلقَّى الماءَ من الرذاذ القليل الأبعاد هي التي لا تذبل.

الجاذبية التي سنشهدها في عالمنا ثلاثي الأبعاد، وإذا كانت الأبعاد كبيرةً بما فيه الكفاية، فسوف نشهد جاذبيةً ضعيفةً للغاية، حتى إن كانت القوة الأساسية للجاذبية كثيرةَ الأبعاد هائلةً. ومع ذلك، علينا أن نتذكَّر أنه لكي تنجح هذه الفكرة، لا بد أن تكون الأبعاد الإضافية ضخمةً مقارَنَةً بما تدفعنا الاعتبارات النظرية لتوقُّعه؛ لأن الجاذبية تظهر بالتأكيد ضعيفةً للغاية في العالم الثلاثي الأبعاد.

لكن مصادم الهادرونات الكبير سيُخضِع هذه الفكرة للاختبارات التجريبية. فمع أن الفكرة تبدو الآن غير محتملة الحدوث، فإن الواقع — وليس سهولة بناء النماذج — هو الذي سيكون له الحكم في النهاية، وإنْ تحقَّقَ ذلك على أرض الواقع، فسوف يكون لهذه النماذج أثر مميز. ولأن الجاذبية الكثيرة الأبعاد تكون قوية عند الطاقات القريبة من النطاق الضعيف — وهي الطاقات التي سينتجها مصادم الهادرونات الكبير — ستتصادم الجسيمات معًا وتنتج جرافيتونًا كثير الأبعاد، وهو الجسيم الذي ينقل قوة الجاذبية الكثيرة الأبعاد. لكن هذا الجرافيتون ينتقل إلى الأبعاد الإضافية، والجاذبية

المألوفة لدينا ضعيفة للغاية، أضعف كثيرًا من أن تنتج جرافيتونًا في حال كان الفضاء يتكوَّن من ثلاثة أبعاد فقط. لكن في هذا السيناريو الجديد، تكون الجاذبية الكثيرة الأبعاد قويةً على نحوٍ كافٍ لإنتاج جرافيتون عند طاقات يمكن لمصادم الهادرونات الكبير الوصول إليها.

وستكون النتيجة هي إنتاج الجسيمات المعروفة باسم أوضاع كالوزا-كلاين، وهي التجسيد للجاذبية الكثيرة الأبعاد في فضاء ثلاثي الأبعاد. وقد سُمِّيَتْ بهذا الاسم نسبةً إلى العالمين تيودور كالوزا وأوسكار كلاين اللذين كانَا أول مَن فكَّرَ في الأبعاد الإضافية في العالم. ولجسيمات كالوزا-كلاين تفاعلات مشابِهة لتفاعلات الجسيمات التي نعرفها، لكن كتلتها أكبر. وترجع هذه الكتل الأثقل وزنًا للزخم الإضافي لهذه الجسيمات في اتجاه البُعْد الإضافي. وإذا ارتبط وضع كالوزا-كلاين بالجرافيتون — مثلما يتنبَّأ سيناريو الأبعاد الإضافية الكبيرة — فبمجرد أن يُنتَج هذا النمط سيختفي من الكاشف، والدليل على وجوده السريع الزوال سيكون الطاقة المفقودة باختفائه. (انظر الشكل ١٧-١١ الذي يصوِّر إنتاج جسيم كالوزا-كلاين، ونقله طاقةً وزخمًا غير مرئيين.)



شكل ١٧-١١: في سيناريو الأبعاد الإضافية الكبيرة، يمكن أن يظهر جسيم كالوزا-كلاين، وهو نظير الجرافيتون، في الأبعاد الإضافية. وإن حدث ذلك، فسيختفي هذا الجسيم من الكاشف مخلِّفًا وراءه دليلًا عليه، وهو الطاقة والزخم.

لا شك أن الطاقة المفقودة تُعَدُّ أيضًا سمةً للنماذج الفائقة التناظر. والعلامات يمكن أن تتشابه للغاية؛ الأمر الذي يؤدِّي إلى أنه حتى في حال اكتشاف شيء ما، فسيفسر على الأرجح العلماء في فريقي الأبعاد الإضافية والتناظر الفائق البيانات بأنها تدعم

توقعاتهم، على الأقل في البداية، لكن مع الاستيعاب الدقيق للنتائج والتنبؤات لكلا النوعين من النماذج، سنتمكَّن من تحديد أي الفكرتين صحيح، هذا إن كان أحدهما صحيحًا بالفعل. ومن أهدافنا في بناء النماذجِ التوفيقُ بين الآثار التجريبية وتفاصيل معانيها الحقيقية، وبمجد أن نحدِّد الاحتمالات المختلفة، نعرف معدل الآثار التي ستظهر بعد ذلك وخصائصها، ويمكننا استخدام هذه الخصائص الدقيقة للتمييز بينها فيما بعدُ.

وعلى أي حال، أشك أنا وزملائي في الوقت الراهن في أن يكون سيناريو الأبعاد الإضافية الكبيرة هو الحل الفعلي لمسألة التسلسل الهرمي، وإنْ كنَّا سنرى فيما يلي نموذجًا مختلفًا تمامًا للأبعاد الإضافية يبشِّر بأن يكون هو الحل. ويرجع أحد أسباب شكوكنا إلى أننا لا نتوقَّع أن تكون الأبعاد الإضافية كبيرةً للغاية. ومن المفترض أن تكون ضخمةً مقارَنةً بالنطاقات الأخرى التي تفرضها المسألة. وبالرغم من أن التسلسل الهرمي بين النطاق الضعيف ونطاق الجاذبية غير موجود من الناحية النظرية، فهناك تسلسل هرمي جديد يتضمَّن حجمَ الأبعاد الجديدة يطرحه هذا السيناريو.

الأمر الأكثر إثارةً للقلق هو أنه في هذا السيناريو، نتوقَّع أن يكون تطوُّر الكون مختلفًا تمامًا عما أشارت إليه عمليات الرصد. والمشكلة هي أن هذه الأبعاد الضخمة ستتمدد في باقي الكون حتى تنخفض درجات الحرارة انخفاضًا كبيرًا. ولكي يكون النموذج مرجحًا في الواقع، لا بد أن يحاكي تطور الكون الذي يتنبَّأ به التطور الذي رصدناه، والذي يتماشى مع ثلاثة أبعاد فقط للفضاء. ويفرض ذلك تحديًا صعبًا للسيناريوهات التي تنطوي على الأبعاد الإضافية الكبيرة.

لكن كلَّ هذه الصعوبات ليست كافيةً لاستبعاد الفكرة كليةً؛ فواضعو النماذج المهرة هم مَن يمكنهم التوصُّل إلى حلول لمعظم المشكلات، لكن لكي تتماشى النماذج مع كافة الملاحظات، تصير غايةً في التعقيد. وأغلب الفيزيائيين متشككون بشأن مثل هذه الأفكار لأسباب جمالية؛ لذا تحوَّل نظرُ الكثيرين منهم إلى أفكار واعدة على نحو أكبر بشأن الأبعاد الإضافية، مثل الأفكار التي سنوضِّحها في الجزء التالي. لكن تظل التجارب وحدها هي التي ستؤكِّد لنا أي الأبعاد الإضافية الكبيرة تنطبق على العالم الحقيقي وأيها لا ينطبق.

البُعْد الإضافي الملتوي

إن الأبعاد الإضافية الكبيرة ليست الحل الوحيد المحتمل لمسألة التسلسل الهرمي، حتى في سياق الكون ذي الأبعاد الإضافية. فما إن طُرِحت فكرة الأبعاد الإضافية حتى توصَّلْتُ أنا ورامانساندرم إلى حلٍّ أفضل،[5] وهو الحل الذي سيتَّفِق أغلب الفيزيائيين على أن حدوثه أكثر ترجيحًا في الواقع. لكن يجب الانتباه هنا إلى أن ذلك لا يعني أن أغلب الفيزيائيين يظنون أنه صحيح. فيشك الكثيرون في أن يحالف الحظُّ أحدًا في الوصول إلى تنبؤات صحيحة بشأن ما سيكشف عنه مصادم الهادرونات الكبير، أو الوصول إلى نموذج صحيح تمامًا دون أي أدلة تجريبية أخرى. لكن هذا الحل يحمل فرصة في أن يكون صحيحًا، شأنه شأن أي حل آخَر. ومثل معظم النماذج الناجحة، يقدِّم هذا الحل استراتيجيات بحثية واضحة تمكِّن الفيزيائيين النظريين والفيزيائيين التجريبيين من استغلال كافة إمكانات مصادم الهادرونات الكبير الاستغلال الأمثل، وربما أيضًا يمكِّن هؤلاء العلماء من اكتشاف أدلة على صحته.

يتضمن هذا الحل، الذي اقترحته أنا ورامان، بُعْدًا إضافيًّا واحدًا فقط لا يكون كبيرًا بالضرورة، فلا حاجة لتسلسل هرمي جديد يتضمَّن حجم هذا البُعْد. وعلى عكس سيناريوهات الأبعاد الإضافية الكبيرة، يتفق تطور الكون تلقائيًّا مع عمليات الرصد الكونية الأخيرة في إطار هذا الحل.

وبالرغم من أن تركيزنا ينصَبُّ في هذا الاقتراح على هذا البُعد الجديد الواحد، فقد توجد أبعاد إضافية للفضاء أيضًا، لكنها لن تلعب في هذا السيناريو دورًا قابلًا للإدراك في تفسير خصائص الجسيمات؛ لذلك يمكننا تجاهلها على نحو مُبرَّر عند دراستنا لحل التسلسل الهرمي — عملًا بمنهج النظرية الفعَّالة — والتركيز على نتائج البُعْد الإضافي الواحد.

إذا صحَّت الفكرة التي اقترحتُها أنا ورامان، فسوف يوضِّح لنا مصادم الهادرونات الكبير خصائص مذهلة لطبيعة الفضاء. إن الكون الذي نقترحه منحنٍ انحناءً كبيرًا، بما يتناسب مع ما علَّمنا إياه أينشتاين عن الزمكان في وجود المادة والطاقة. وبمصطلحات فنية، يمكننا القول إن الهندسة التي استقيناها من معادلات أينشتاين بشأن الكون «ملتوية» (هذا المصطلح الفني كان موجودًا من قبلُ)، ومعنى ذلك أن الزمان والمكان يتنوعان في البُعْد الإضافي الفردي المعني، وتكون نتيجة ذلك تغيُّر نطاق الزمان والمكان،

وكذا الكتل والطاقة، عند انتقالك من مكان لآخَر في الفضاء ذي الأبعاد الإضافية، وهذا ما سنتناوله فيما يلي ويستعرضه الشكل ١٧-١٣.



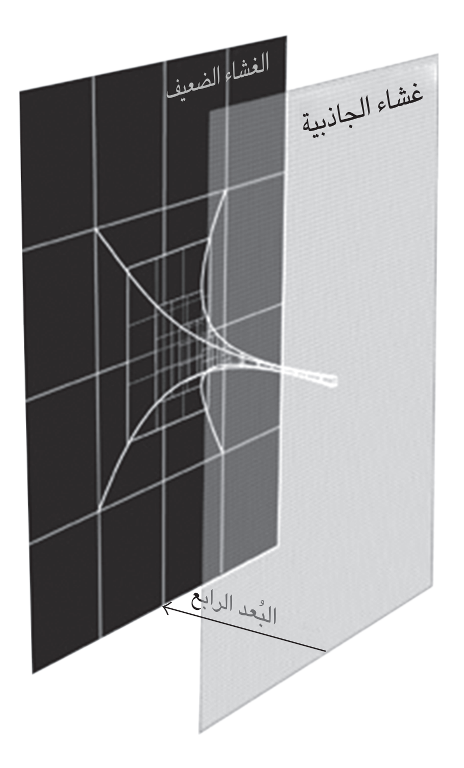
شكل ١٧-١٢: يتضمن اقتراح راندل وساندرم غشاءين يرتبطان ببُعْدٍ رابعٍ للفضاء (أو بُعْدٍ خامسٍ للزمكان). وفي هذا البُعْد، تنخفض الدالة الموجية للجرافيتون (التي توضِّح احتمالية العثور على الجرافيتون عند أي نقطة في الفضاء) انخفاضًا أسيًّا من غشاء الجاذبية إلى الغشاء الضعيف.

من النتائج المهمة لهذه الهندسة الزمكانية الملتوية أنه بينما يكون جسيم هيجز ثقيلًا في موقع آخَر بالفضاء ذي الأبعاد الإضافية، ستكون كتلته ضعيفة (كما هو الواقع بالفعل) في الموقع الذي نوجد فيه. قد يبدو ذلك أمرًا اعتباطيًّا إلى حد ما، لكنه ليس كذلك؛ فوفقًا للسيناريو الذي وضعناه، ثمة غشاء نعيش عليه، وهو الغشاء الضعيف، وغشاء آخَر تتركَّز فيه الجاذبية يُسمَّى غشاء الجاذبية، أو غشاء بلانك كما يعرفه الفيزيائيون، وهذا الغشاء يحتوي على كون آخَر منفصل عنَّا في أحد الأبعاد الإضافية (انظر الشكل ١٧-١٢). وفي هذا السيناريو، يكون الغشاء الثاني مجاورًا للغشاء الذي نعيش عليه بالضبط، ولا تفصله عنه سوى مسافة متناهية الصغر، وهي مسافة أصغر من السنتيمتر الواحد بمليون تريليون تريليون مرة.

والسمة المميزة الناتجة عن هذه الهندسة الملتوية (موضَّحة في الشكل ١٧-١٢) هي أن «الجرافيتون» — الجسيم الناقل لقوة الجاذبية — يكون أثقل بكثير في الغشاء الآخَر مقارَنةً بالغشاء الذي نعيش عليه. ويجعل ذلك الجاذبيةَ قويةً في مكان آخَر في البُعْد الآخَر، وضعيفةً في المكان الذين نعيش فيه. وقد توصَّلْتُ أنا ورامان، في الواقع، إلى أن الجاذبية لا بد أن تكون أضعف بكثير عندنا مقارَنةً بالغشاء الآخَر، ما يقدِّم تفسيرًا طبيعيًّا لضعف الجاذبية.

ثمة أسلوب بديل لتفسير نتائج هذا الاقتراح عن طريق الهندسة والزمكان، وهو الموضح في رسم تخطيطي بالشكل ١٧-١٣. يعتمد نطاق الزمكان على الموقع في البُعْد المكاني الرابع؛ ومن ثَمَّ يتغيَّر نطاق الكتل تغيُّرًا كبيرًا أيضًا، ويحدث ذلك على النحو الذي تحتاجه كتلة بوزون هيجز. ورغم أنه يمكن التشكيك في الافتراضات التي يقوم عليها نموذجنا (وهذه الافتراضات هي وجود غشاءين مسطحين كبيرين يحيطان بكون ذي أبعاد إضافية)، فإن الهندسة نفسها لهذا النموذج تتبع مباشرةً نظرية الجاذبية لأينشتاين عندما تفترض وجود الطاقة التي تحملها الأغشية ويحملها الفضاء ذو الأبعاد الإضافية المعروف باسم «الكتلة». لقد حللنا أنا ورامان معادلات النسبية العامة، وعندما فعلنا ذلك، توصَّلنا إلى الهندسة التي وصفتها للتوِّ، وهي الفضاء الملتوي المنحني الذي يُعَاد تقدير نطاق الكتل فيه على النحو اللازم لحل مشكلة التسلسل الهرمي.

على عكس نماذج الأبعاد الإضافية الكبيرة، لا تفرض النماذج القائمة على الهندسة الملتوية معضلة جديدة (والتي تتمثل في حالة النماذج الإضافية الكبيرة في السؤال: «ما السبب وراء ضخامة حجم الأبعاد الإضافية؟») بدلًا من معضلة التسلسل الهرمي



شكل ١٧-١٣: ثمة سبيل آخَر لفهم السبب وراء حل الهندسة الملتوية لمسألة التسلسل الهرمي يكمن في الهندسة نفسها؛ فنطاق المكان والزمان والطاقة والكتلة يعاد تقديره عند الانتقال من غشاء لآخَر. وفي هذا السيناريو، يكون من الطبيعي تمامًا التوصُّل إلى أن كتلة هيجز أصغر بكثير من كتلة بلانك.

القديمة. ففي الهندسة الملتوية، البُعْد الإضافي لا يكون كبيرًا، والأرقام الكبيرة تنبع من إعادة التقدير الأُسِّيَّة لنطاق الزمان والمكان، وهذه الإعادة تجعل نسبة أحجام الأجسام — وكتلها — ضخمة، حتى عندما لا يفصل بين الأجسام سوى مساحة بُعْد إضافي بسيطة.

هذه الدالة الأُسِّيَّة ليست مُختلَقة، وإنما هي مستقاة من الحل الفريد لمعادلات أينشتاين في السيناريو الذي اقترحناه. وقد أشارت الحسابات التي أجريتُها بالتعاون مع رامان إلى أنه في الهندسة الملتوية، تكون نسبة قوة الجاذبية والقوة الضعيفة هي

القيمة الأُسِّيَّة للمسافة بين الغشاءين؛ ومن ثَمَّ إذا كان المسافة الفاصلة بين الغشاءين لها قيمة معقولة — تبلغ العشرات أو ما إلى ذلك من حيث النطاق الذي تحدِّده الجاذبية — فسيظهر التسلسل الصحيح بين الكتل وشدة القوى ظهورًا طبيعيًّا.

في الهندسة الملتوية، تكون الجاذبية التي نستشعرها ضعيفة، ولا يرجع السبب في ذلك إلى أنها مشتتة بأرجاء الأبعاد الإضافية الكبيرة، وإنما لأنها مركزة في مكان آخَر، وهو الغشاء الآخَر. وتنشأ الجاذبية التي نستشعرها كأثر طفيف لما يمثِّل في مناطق أخرى من العالم ذي البُعْد الإضافي قوةً هائلةً.

ونحن لا نرى الكون بالغشاء الآخَر لأن القوة الوحيدة المشتركة هي الجاذبية، والجاذبية المحيطة بنا ضعيفة للغاية؛ مما يمنعها من نقل إشارات يمكن ملاحظتها. ويمكن، في الواقع، اعتبار هذا السيناريو نموذجًا للكون المتعدِّد، الذي تتفاعَل فيه العناصر والأشياء الموجودة في عالمنا تفاعلًا ضعيفًا للغاية، أو لا تتفاعل على الإطلاق في بعض الأحيان، مع الأشياء الموجودة في عالم آخَر. وأغلب هذه التكهنات لا يمكن اختبار صحتها، وستُترَك للخيال. ففي النهاية، إذا كانت المادة بعيدةً للغاية بحيث لا يتمكَّن الضوء من الوصول إليها أثناء عمر الكون، فلا يمكننا اكتشافها. وسيناريو «الكون المتعدِّد» الذي اقترحته أنا ورامان غريب من حيث إن قوة الجاذبية المشتركة تؤدِّي إلى نتائج قابلة لاختبار صحتها تجريبيًّا، فنحن لا نصل إلى الكون الآخَر مباشَرةً، وإنما الجسيمات التي تنتقل في الكتلة الكثيرة الأبعاد يمكن أن تصل إلينا.

والأثر الأكثر وضوحًا للعالم ذي الأبعاد الإضافية — في غياب الأبحاث المفصلة مثل الأبحاث التي تُجرَى في مصادم الهادرونات الكبير — سيمثِّل تفسيرًا للتسلسل الهرمي لنطاقات الكتلة التي تحتاج إليها نظريات فيزياء الجسيمات للنجاح في تفسير الظواهر المرصودة. وهذا، بالطبع، ليس كافيًا لنا لمعرفة ما إذا كان هذا التفسير هو الذي ينطبق في العالم أم لا، لأنه ليس مميزًا بين الحلول المقترَحة.

لكن الطاقة العالية التي سيصل إليها مصادم الهادرونات الكبير من المفترض أن تساعدنا في اكتشاف ما إذا كان البُعْد الإضافي للفضاء مجرد فكرة عجيبة أم حقيقة فعلية في الكون. وإذا كانت النظرية التي وضعناها صحيحة، فمن المتوقع أن ينتج مصادم الهادرونات الكبير أوضاع كالوزا-كلاين. ونظرًا للعلاقة مع مسألة التدرج الهرمي، يكون نطاق الطاقة الصحيح للبحث عن أوضاع كالوزا-كلاين في هذا السيناريو هو الذي سيفحصه مصادم الهادرونات الكبير. ومن المفترض أن تبلغ كتلة هذه الأوضاع

نحو ١ تيرا إلكترون فولت، وهو نطاق الكتلة الضعيفة، وبمجرد أن يرتفع مستوى الطاقة بالقدر الكافي، يصير من الممكن إنتاج هذه الجسيمات الثقيلة. واكتشاف جسيمات كالوزا-كلاين سيمثِّل دليلًا أساسيًّا يقدِّم لنا معلومات دقيقة حول العالم الممتد بشكل كبير.

في الواقع، أوضاع كالوزا-كلاين بالهندسة الملتوية لها خاصية مهمة ومميزة. ففي الوقت الذي يتَّسِم فيه جسيم الجرافيتون بقوة تفاعُلٍ ضعيفة للغاية — فهو، في النهاية، ينقل قوة الجاذبية الضعيفة للغاية — تتفاعل أوضاع كالوزا-كلاين لجسيم جرافيتون بقوة أكبر بكثير تصل إلى مستوى القوة التي تُعرَف بالقوة الضعيفة، والتي تزيد في الواقع بتريليونات المرات عن قوة الجاذبية.

والسبب وراء قوة التفاعل الشديدة المذهلة لجرافيتونات كالوزا-كلاين هو الهندسة الملتوية التي تنتقل عبرها؛ فنظرًا للانحناء الهائل للزمكان، تكون تفاعلات جرافيتون كالوزا-كلاين أقوى بكثير من تفاعلات الجرافيتون الذي ينقل قوة الجاذبية التي نستشعرها. وفي الهندسة الملتوية، لا يُعَاد تحديد نطاق الكتل فحسب، وإنما أيضًا تفاعلات الجاذبية. وتوضِّح الحسابات أنه في الهندسة الملتوية، تكون تفاعلات جرافيتون كالوزا-كلاين مشابِهة لتفاعلات جسيمات النطاق الضعيف.

يعني ذلك أنه على عكس النماذج الفائقة التناظر، ونماذج الأبعاد الإضافية الكبيرة، لن يكون الدليل التجريبي لهذا السيناريو هو الطاقة المفقودة الناتجة عن هروب الجسيم محل الاهتمام دون أن يُرَى، وإنما سيكون الدليلُ أوضحَ بكثير وأيسر في التعرُّف عليه، وسيتمثَّل في جسيم يتحلَّل داخل جهاز الكاشف إلى جسيمات النموذج القياسي بحيث يخلِّف آثارًا مرئية. (انظر الشكل ١٧-١٤ الذي يظهر فيه إنتاج جسيم كالوزا-كلاين وتحلله إلى إلكترون وبوزيترون، مثلًا.)

هكذا اكتشف، في الواقع، الفيزيائيون التجريبيون جميعَ الجسيمات الثقيلة الجديدة حتى الآن، فهم لا يَرَون الجسيمات مباشَرَةً، وإنما يرصدون ما ينتج عن تحللها من جسيمات أخرى. وتقدِّم هذه الجسيمات الأخرى قدرًا أكبر من المعلومات مقارَنَةً بما تقدِّمه الطاقة المفقودة. ومن خلال دراسة خصائص نواتج التحلل هذه، يتمكَّن الفيزيائيون التجريبيون من التوصُّل إلى خصائص الجسيم الأصلي الذي نتجت عنه.

إذا كان سيناريو الهندسة الملتوية صحيحًا، فسوف نرى قريبًا أزواجًا من الجسيمات تنشأ عن تحلل أوضاع جرافيتون كالوزا-كلاين، ومن خلال قياس الطاقات والشحنات

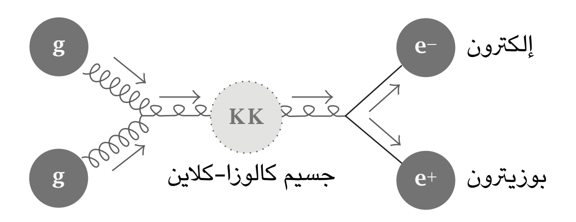
وغيرها من الخصائص الأخرى لجسيمات الحالة النهائية، سيتمكَّن الفيزيائيون التجريبيون من استنتاج كتلة جسيمات كالوزا-كلاين وخصائصها الأخرى. ومن المفترض أن تساعد هذه الخصائصُ المميزة، بالإضافة إلى التكرار النسبي لتحلل الجسيمات إلى الحالات النهائية المتعددة، الفيزيائيين التجريبيين في تحديد ما إذا كانوا قد اكتشفوا جرافيتون كالوزا-كلاين أم شيئًا آخَر جديدًا تمامًا. ويوضِّح لنا النموذجُ طبيعةَ الجسيم الذي من المفترض العثور عليه ليتمكَّنَ الفيزيائيون من إجراء التنبؤات للتمييز بين الاحتمالات.

ثمة صديق لي (وهو كاتب سيناريو يمدح ويهجو في الوقت نفسه تجاوزات الطبيعة البشرية) لا يفهم كيف لا أترقب صدور النتائج على أحر من الجمر، مع الوضع في الاعتبار الآثار المحتملة للاكتشافات التي قد يتم التوصُّل إليها. وكلما أراه، يسألني في إلحاح: «ألن تغيِّر النتائجُ وجهَ العالم؟ أليس من الممكن أن تثبت صحة نظرياتك؟» هذا فضلًا عن سؤاله: «لماذا لا تمكثين هناك (في جنيف) وتتحدثين مع الناس هناك باستمرار؟»

وقد كان محقًّا، بالطبع، في تساؤلاته إلى حدٍّ ما، لكن الفيزيائيين التجريبيين يعرفون بالفعل ما يتوجَّب عليهم البحث عنه، وبذلك تكون قد انتهت مهمة الفيزيائيين النظريين. فعندما تكون لدينا أفكار جديدة عمَّا ينبغي البحث عنه، نصرِّح بها، لكن لا يتوجَّب علينا التواجد في مقر سيرن أو حتى التواجد في نفس الغرفة لتحقيق ذلك؛ فيمكن أن يتواجَدَ الفيزيائيون التجريبيون بجميع أنحاء الولايات المتحدة وبأي مكان في العالم. والتواصل عن بُعْد ناجحٌ في هذا الشأن، ويرجع الفضل في ذلك إلى فكرة الإنترنت التي توصَّلَ إليها تيم بيرنرز لي منذ سنوات طويلة في سيرن.

بالإضافة إلى ذلك، فلديَّ من المعرفة ما يجعلني أعلم مدى الصعوبة التي قد تكون عليها هذه الأبحاث، حتى بعد أن يعمل مصادم الهادرونات الكبير بكامل قدرته؛ لذلك فأنا أعلم أننا قد نضطر للانتظار قليلًا لمعرفة النتائج. ولحسن حظنا، فإن أوضاع كالوزا-كلاين، التي وصفناها للتوِّ، من أيسر الأشياء التي يمكن للفيزيائيين التجريبيين البحث عنها. فجسيمات كالوزا-كلاين تتحلل إلى كافة أنواع الجسيمات — فجميع الجسيمات تتأثَّر بالجاذبية — ومن ثَمَّ يمكن للفيزيائيين التجريبيين التركيز على الحالات النهائية التي يسهل عليهم تحديدها.

لكنَّ ثمة ملاحظتين ينبغي الالتفات إليهما، وهما أمران قد يزيدان من صعوبة الأبحاث مقارَنةً بما كان متوقَّعًا لها في البداية، وقد يدفعانِنَا لانتظار الاكتشافات فترةً طويلةً، حتى إن كانت الفكرة الأساسية صحيحة.



شكل ١٧-١٤: في نماذج راندل-ساندرم، يمكن أن ينتج جرافيتون كالوزا-كلاين ويتحلل داخل الكاشف إلى جسيمات مرئية، مثل الإلكترون والبوزيترون.

الملاحظة الأولى هي أن النماذج الأخرى المحتملة بالهندسة الملتوية قد تؤدِّي إلى دلالات تجريبية أكثر فوضوية وأكثر صعوبةً في العثور عليها. فالنماذج تصف أطر العمل الأساسية، التي تتضمن في حالتنا هذه بُعْدًا إضافيًّا وأغشية. تقترح هذه النماذج أيضًا تطبيقات محددة للمبادئ العامة التي يجسِّدها إطار العمل. والسيناريو الأصلي الذي وضعناه يشير إلى أن الجاذبية فقط هي التي انتشرت في أرجاء الفضاء الكثير الأبعاد المعروف باسم «الكتلة»، لكن بعض العلماء عملوا بعد ذلك على تطبيقات بديلة. في هذه السيناريوهات البديلة، لا تتواجد جميع الجسيمات على الأغشية، وقد يعني ذلك وجود عدد أكبر من جسيمات كالوزا-كلاين؛ لأن كل جسيم بالكتلة سيكون له أوضاع كالوزا-كلاين الخاصة به، لكن اتضح أيضًا أنه سيكون من الأصعب العثور على جسيمات كالوزا-كلاين هذه. دفعت هذه الصعوبة العلماء لإجراء عدد كبير من الأبحاث حول كيفية اكتشاف هذه السيناريوهات الأكثر مراوغةً. والأبحاث التي تلت ذلك ستثبت نفعها، ليس فقط من ناحية البحث عن جسيمات كالوزا-كلاين، وإنما أيضًا البحث عن أي جسيمات كبيرة عالية الطاقة قد يحتوي عليها أي نموذج جديد.

أما السبب الثاني وراء احتمال صعوبة الأبحاث، فيرجع إلى أن جسيمات كالوزا-كلاين قد تكون أثقل مما نأمل، فنحن نعرف معدل الكتل المتوقعة لجسيمات كالوزا-كلاين، لكننا لم نعرف بعدُ قيمها المحددة. فإذا كانت هذه الجسيمات خفيفة الوزن، فسينتجها مصادم الهادرونات الكبير بسهولة بكميات كبيرة، وسيسهل اكتشافها، لكنها إذا كانت أثقل وزنًا، فقد لا ينتج المصادم سوى كمية قليلة منها فقط. وإذا كانت أثقل وزنًا بكثير، فقد لا ينتجها المصادم على الإطلاق. بعبارة أخرى، قد تتطلَّب الجسيمات

والتفاعلات الجديدة طاقات أعلى من تلك التي سيصل إليها مصادم الهادرونات الكبير لكي تتحقق، وقد كان هذا الأمر من المخاوف المثارَة دومًا بشأن المصادم في ظلِّ حجم النفق الثابت والطاقة المحدودة التي يمكن أن يصل إليها.

وبوصفي فيزيائية نظرية، ليس بوسعي فعل أي شيء في هذا الشأن؛ فطاقة المصادم لن تتغير. لكن يمكننا محاولة العثور على أدلة دقيقة على وجود الأبعاد الإضافية، حتى إذا كانت أوضاع كالوزا-كلاين ثقيلة للغاية. عندما أجريتُ مع باتريك ميد الحسابات بشأن معدل إنتاج الثقوب السوداء المحتملة الكثيرة الأبعاد، لم نركِّز على النتيجة السلبية فحسب — وهي أن يكون معدل إنتاج هذه الثقوب أقل بكثير من توقعاتنا — وإنما تفكَّرنا أيضًا فيما قد يحدث إذا كانت جاذبية الأبعاد الكثيرة قوية، حتى إن لم تنتج أي ثقوب سوداء. وتساءلنا عمَّا إذا كان من الممكن لمصادم الهادرونات الكبير أن ينتج دلالات على جاذبية الأبعاد الكثيرة أم لا، وتوصَّلنا إلى أنه حتى في حالة عدم اكتشاف أي جسيمات جديدة أو أجسام غريبة مثل الثقوب السوداء، من المفترض أن يتمكَّنَ الفيزيائيون التجريبيون من ملاحظة انحرافات عن تنبؤات النموذج القياسي. والاكتشاف ليس مضمونًا، لكن الفيزيائيين التجريبيين سيفعلون كل ما في وسعهم باستخدام المصادم والكواشف القائمة بالفعل. وفي بحث آخَر أكثر تقدُّمًا، فكَّرَ بعض الزملاء في أساليب أخرى محسنة للبحث عن أوضاع كالوزا-كلاين، حتى إذا كانت جسيمات النموذج القياسي موجودة في الكتلة.

ثمة احتمال أيضًا أن يحالفنا الحظ، وتكون كتل الجسيمات الجديدة وتفاعلاتها أقل مما نتوقَّع، وإن حدث ذلك، فلن نعثر على أوضاع كالوزا-كلاين قريبًا فحسب، وإنما سنرى كذلك ظواهر أخرى جديدة. وإذا كانت نظرية الأوتار هي النظرية الأساسية للطبيعة، وكان نطاق الفيزياء الجديدة منخفضًا، فسوف يُنتج مصادم الهادرونات الكبير — إلى جانب جسيمات كالوزا-كلاين والتفاعلات الجديدة — جسيمات أخرى ترتبط بالأوتار المتذبذبة الأساسية، وهذه الجسيمات ستكون ثقيلة للغاية بما يمنع تكوُّنها في ظلِّ الافتراضات العادية، لكن في ظل الالتواء، ثمة أمل في أن تكون أوضاع الأوتار أخفَّ وزنًا بكثير مما هو متوقَّع؛ ومن ثَمَّ يمكن أن تظهر في نطاق الطاقة الضعيفة.

من الجليِّ أن هناك العديد من الاحتمالات المثيرة للهندسة الملتوية، ونحن ننتظر في شغفٍ نتائجَ التجارب. وفي حال اكتشاف نتائج هذه الهندسة، فسوف نغيِّر نظرتنا للكون، لكننا لن ندرك أي هذه الاحتمالات يتحقَّق في الطبيعة — هذا إنْ تحقَّق أحدها بالفعل — إلا بعد إجراء مصادم الهادرونات الكبير لأبحاثه.

العودة لأهمية المصادم

تختبر التجارب الآن في مصادم الهادرونات الكبير جميعَ الأفكار التي تناوَلَها هذا الفصل، ونأمل في حالة صحة أيٍّ من هذه النماذج، أن تظهر دلالات عليه قريبًا. قد تظهر أدلة دامغة على ذلك، مثل أوضاع كالوزا-كلاين، أو قد تظهر تغيُّرات دقيقة في عمليات النموذج القياسي. وفي الحالتين، يظل الفيزيائيون التجريبيون والفيزيائيون النظريون على حدٍّ سواء في حالة ترقُّب وانتظار، وفي كل مرة يرى أو لا يرى فيها المصادم شيئًا ما، يزيد ذلك من تقييد الاحتمالات. وإذا حالفنا الحظ، فقد تثبت صحة إحدى الأفكار التي تناولناها الآن. ومع تعرفنا على المزيد بشأن ما يمكن لمصادم الهادرونات الكبير إنتاجه، وكيفية عمل الكواشف، سنتعرَّف على المزيد من المعلومات حول كيفية توسيع نطاق أبحاث المصادم لاختبار أكبر قدر ممكن من الاحتمالات. وعندما تتوفَّر البيانات، سيضمها الفيزيائيون النظريون إلى مقترحاتهم.

نحن لا نعرف الوقت الذي سيستغرقه الأمر قبل أن نبدأ في الوصول إلى إجابات؛ لأننا لا نعرف ما هو موجود وما يمكن أن تكون عليه الكتل والتفاعلات؛ فقد نتوصَّل إلى بعض الاكتشافات في غضون عام أو عامين، وقد تستغرق اكتشافات أخرى أكثر من عشر سنوات، وقد يتطلَّب بعضها طاقات أعلى من تلك التي يمكن أن يصل إليها مصادم الهادرونات الكبير. والترقُّب يثير القلق في النفس، لكن النتائج قد تأسر الألباب، الأمر الذي يجعل الأمر جديرًا بالمشقة. وقد تغيِّر هذه النتائج نظرتنا لطبيعة الواقع أو على الأقل المادة التي تتكون منها أجسادنا، وعندما تظهر النتائج، يمكن أن تنشأ عوالم جديدة تمامًا. وعلى مدار حياتنا، قد تختلف نظرتنا للعالم اختلافًا جذريًّا.

الفصل الثامن عشر

الأسلوب التصاعدي في مقابل التنازلي

ما من شيء يعوِّض النتائج التجريبية الموثوقة، لكننا كفيزيائيين لم نترقَّب فقط تشغيل مصادم الهادرونات الكبير وتوصله إلى بيانات مهمة على مدار ربع القرن الماضي، بل عمدنا إلى التفكير الجاد طويلًا بشأن ما يجب على التجارب البحث عنه والمعاني المحتملة للبيانات، ودرسنا كذلك نتائج التجارب التي جرت في أثناء هذا الإطار الزمني، وتوصَّلْنا من خلالها إلى معلومات حول الجسيمات والتفاعلات المعروفة، وساعدنا ذلك في توجيه فكرنا.

كانت هذه المرحلة الفاصلة بمنزلة فرصة عظيمة للتفكير على نحوٍ أكثر عمقًا في الأفكار التي لا تعضدها البيانات في الوقت الراهن على الأقل. ونتج عن هذه المساعي الرياضية بعض من المدارك النظرية والأساليب التأملية الأكثر إثارةً للاهتمام خلال الخمسة والعشرين عامًا الماضية. وأشك — شخصيًّا — أنني كنتُ سأفكر في الأبعاد الإضافية أو الجوانب الرياضية للتناظُر الفائق إذا كانت البيانات أكثر وفرةً من ذلك، فحتى إن كانت القياسات التي ستدعم هذه الأفكار في النهاية قد أجريت، كانت الآثار ستستغرق فترة من الوقت لتظهر دون توفُّر المساعي الرياضية السابقة.

يؤدِّي كلٌّ من التجارب والحسابات الرياضية إلى التطورات العلمية. لكن نادرًا ما يكون سبيلُ التقدم واضحًا، وانقسم الفيزيائيون حول أفضل استراتيجية يمكن اتباعها؛ فيستخدم واضِعو النماذجِ الأسلوبَ «التصاعديَّ»، المُشار إليه في الفصل الخامس عشر، للبدء مما هو معلوم من التجارب، ثم تناول الخصائص المحيرة غير المُفسَّرة. ويوظفون عادةً في هذا الأسلوب التطورات التي تتسم بقدر أكبر من الجانب الرياضي النظري. وقد

استعرضنا في الفصل السابق بعض أمثلة النماذج المحدَّدة، وكيف تؤثِّر في الأبحاث التي سيجريها الفيزيائيون التجريبيون في مصادم الهادرونات الكبير.

على الجانب الآخَر، يتبع بعض العلماء، لا سيما علماء نظرية الأوتار، أسلوبًا «تنازليًّا» في التفكير؛ حيث يبدءون بالنظرية التي يؤمنون بصحتها — نظرية الأوتار في هذه الحالة — ويحاولون استخدام المفاهيم التي تتضمنها هذه النظرية لصياغة نظرية كمية مُتَّسِقة للجاذبية. تتحقق النظريات التنازلية عند طاقات عالية ومسافات صغيرة، ويشير تعريفها إلى المفهوم النظري بأن كلَّ شيء يمكن استنتاجه من الافتراضات الأساسية التي تحدِّدها نطاقات الطاقة العالية. وبالرغم من أن هذا الاسم قد يكون محيِّرًا لأن الطاقات العالية تتماشى مع المسافات القصيرة، فإنه يجب التذكُّر هنا أن المكونات عند المسافات الصغيرة هي اللبنات الأساسية للمادة. وفي هذا الأسلوب الفكري، يمكن استقاء كلِّ شيء من المبادئ الأساسية والمكونات الجوهرية التي تتحقَّق في المسافات الصغيرة والطاقات العالية؛ ومن هنا جاءت التسمية: «الأسلوب التنازلي».

يستعرض هذا الفصل الأسلوبين التصاعدي والتنازلي، وجوانب الاختلاف بينهما. سوف نتناول الاختلافات، لكننا سنناقش أيضًا كيف يجتمعان أحيانًا للوصول إلى مدارك مميزة.

نظرية الأوتار

على عكس واضعي النماذج، يحاول الفيزيائيون ذوو التوجُّه الرياضي بدء عملهم من نظرية خالصة. فهم يأملون في البدء من نظرية واحدة منمقة واستقاء النتائج منها، ثم يطبقون بعد ذلك الأفكار على البيانات، وأغلب محاولات التوصُّل إلى نظرية موحدة تستخدم هذا الأسلوب التنازلي. ولعل نظرية الأوتار هي أبرز الأمثلة على ذلك؛ فهي تهدف للتوصُّل إلى إطار العمل الأساسي الذي تقوم عليه نظريًّا بعد ذلك جميع ظواهر الفيزياء المعروفة.

يأخذ علماءُ نظرية الأوتار نَقْلَةً هائلة في النطاقات الفيزيائية التي يحاولون خوضها؛ فينتقلون من النطاق الضعيف إلى نطاق بلانك حيث الجاذبية القوية. ولن تختبر التجارب، على الأرجح، صحة هذه الأفكار مباشَرةً في أي وقت قريب (يُستثنَى من ذلك نماذج الأبعاد الإضافية الموضحة في الفصل السابق). لكن رغم أن نظرية الأوتار

نفسها يصعب اختبار صحتها، تقدِّم عناصر هذه النظرية أفكارًا ومفاهيم ضمتها النماذج التي يمكن ملاحظتها.

والسؤال الذي يطرحه الفيزيائيون عندما يتخذون قرارًا بشأن الاختيار بين بناء النماذج ونظرية الأوتار هو: هل يتبعون المنهج الأفلاطوني، الذي يحاولون من خلاله جَنْيَ المعارف من بعض جوانب الحقيقة الأساسية، أم المنهج الأرسطي القائم على الملاحظات التجريبية؟ هل يتبعون الأسلوب «التنازلي» أم «التصاعدي»؟ يمكن التعبير أيضًا عن هذا الخيار بأنه «منهج أينشتاين العجوز مقابل أينشتاين الشاب». فكَّرَ أينشتاين، في البداية، في التجارب القائمة على المواقف الفيزيائية، لكنه قدَّر أيضًا الجمال والأناقة، فحتى عندما تناقضت نتائج التجارب مع أفكاره عن النسبية الخاصة، قرَّرَ بثقةٍ (وأثبت قراره صحته في النهاية) أن التجربة لا بد أن تكون خاطئة؛ لأن نتائجها أقبح مما يمكن تصديقه.

ازداد ميل أينشتاين للرياضيات بعد أن أعانته على إتمام نظريته عن النسبية العامة. فنظرًا لما لعبته التطورات الرياضية من دور مهم في استكماله لنظريته، صار لديه إيمان أكبر بالأساليب النظرية في مسيرته المهنية بعد ذلك. لكن النظر إلى أينشتاين لن يحل المشكلة؛ فرغم تطبيقه الناجح للرياضيات على النسبية العامة، لم يؤت بحثه الرياضي اللاحق عن نظرية موحدة ثمارَه قط.

كانت نظرية التوحيد العظمى، التي اقترحها هوارد جورجي وشيلدون جلاشو، من الأفكار القائمة على الأسلوب التنازلي أيضًا. فقامت هذه النظرية على البيانات؛ إذ كان العامل الملهم لتخميناتها هو مجموعة الجسيمات والقوى المحددة الموجودة في النموذج القياسي، والقوة التي تتفاعل بها، لكن النظرية استنتجت مما نعرفه ما يمكن أن يحدث في نطاقات الطاقة البعيدة للغاية.

المثير للاهتمام أنه بالرغم من أن التوحيد يمكن أن يحدث عند طاقات أعلى بكثير مما يمكن لمعجِّل الجسيمات الوصول إليها، كان التنبُّؤ الذي توصَّلَ إليه النموذج الأولي لنظرية التوحيد العظمى قابلًا للرصد. فقد تنبَّأ نموذج نظرية التوحيد العظمى لجورجي وجلاشو باحتمال تحلُّل البروتون، وكان هذا التحلل سيستغرق وقتًا طويلًا، لكن الفيزيائيين التجريبيين جهَّزوا أوعيةً ضخمة من المواد على أمل أن يتحلَّل بروتون واحد على الأقل من البروتونات الموجودة بداخلها، ويخلِّف أثرًا مرئيًّا، ولمَّا لم يحدث ذلك، استُبعِد نموذج نظرية التوحيد العظمى.

منذ ذلك الحين، لم يعمل جورجي أو جلاشو على أي نظرية تتبع الأسلوب التنازلي وتقفز هذه القفزة الهائلة من الطاقات التي يمكننا الوصول إليها مباشَرةً في المعجِّلات إلى الطاقات المستبعدة تمامًا، والتي قد يكون لها نتائج تجريبية دقيقة أو لا يكون لها نتائج على الإطلاق، وهو الأمر الأكثر ترجيحًا. فقد توصَّلَا إلى أنه من المستبعد للغاية إجراء تخمين صحيح لنظرية بعيدة تمامًا من حيث الطاقة والمسافة عن أي شيء نستوعبه حاليًّا.

رغم هذه التحفُّظات، قرَّرَ الكثير من الفيزيائيين الآخَرين أن الأسلوب التنازلي هو السبيل الوحيد لخوض مسائل نظرية صعبة معينة. اختار علماء نظرية الأوتار العمل في سياق صعب لا يمثِّل العلم التقليدي بوضوح، لكنه أدَّى إلى مجموعة ثرية من الأفكار، وإن كانت مثيرة للجدل. وهم يفهمون بعض الجوانب في النظرية التي وضعوها، لكنهم لا يزالون يجمعون أجزاءها معًا، باحثين عن المبادئ الأساسية أثناء ذلك ومطوِّرين أفكارهم الثورية.

والدافع وراء نظرية الأوتار كنظرية للجاذبية لم ينبع من البيانات، وإنما من المعضلات النظرية. فتقدم هذه النظرية مرشحًا طبيعيًّا للجرافيتون، وهو الجسيم الذي تنص ميكانيكا الكم على ضرورة وجوده ونقله لقوة الجاذبية. هذا الجسيم هو المرشح الرئيسي لنظرية الجاذبية الكمية المتكاملة، التي تضم كلًّا من ميكانيكا الكم ونظرية النسبية العامة لأينشتاين، وتتحقَّق بجميع مستويات الطاقة التي يمكن بلوغها.

يمكن للفيزيائيين استخدام النظريات المعروفة لإجراء تنبؤات يمكن الاعتماد عليها عند مسافات صغيرة، مثل النطاق الداخلي للذرة؛ حيث تلعب ميكانيكا الكم دورًا كبيرًا، وتكون الجاذبية مهملة. ونظرًا لأن الجاذبية لها هذا التأثير الهزيل على جسيمات الكتلة الذرية، يمكننا استخدام ميكانيكا الكم وتجاهُل الجاذبية دون أن يكون لذلك أي أثر خطير. يمكن للفيزيائيين أيضًا إجراء التنبؤات بشأن الظواهر عند مسافات كبيرة، مثل الجزء الداخلي من المجرات؛ حيث تهيمن الجاذبية على التنبؤات ويمكن تجاهُل ميكانيكا الكم.

لكننا نفتقر إلى نظرية تشمل كلًّا من ميكانيكا الكم والجاذبية، وتعمل عند جميع الطاقات والمسافات المحتملة، ولا نعلم بوجه خاص كيف نجري الحسابات عند الطاقات العالية جدًّا والمسافات القصيرة جدًّا، مقارَنةً بطاقة وطول بلانك. ونظرًا لأن تأثير الجاذبية أكبر في الجسيمات الأثقل وزنًا والأعلى في طاقتها، فإن الجاذبية التي تؤثِّر على

جسيمات كتلة بلانك سيكون لها دورٌ محوريٌّ، وعند طول بلانك الدقيق تلعب ميكانيكا الكم أيضًا دورًا مهمًّا.

وبالرغم من أن هذه المشكلة لا تفسد أيًّا من الحسابات المتعلقة بالظواهر القابلة للرصد — لا سيما الظواهر الموجودة بمصادم الهادرونات الكبير — فإنها تعني أن الفيزياء النظرية غير كاملة. لكن الفيزيائيين لم يعلموا بعدُ كيف يضمنون ميكانيكا الكم والجاذبية عند الطاقات العالية جدًّا أو المسافات القصيرة جدًّا حيث تكون لكلتيهما أهمية متشابهة في التنبؤات، ولا يمكن تجاهُل أيٍّ منهما. هذه الثغرة المهمة في فهمنا يمكن أن توجِّه تفكيرَنا بعد ذلك، ويرى كثيرون أن نظرية الأوتار يمكن أن تمثِّل الحل.

واسم «نظرية الأوتار» مستمَد من الوتر المتذبذب الرئيسي الذي شكَّلَ جوهر التكوين الأولي. توجد الجسيمات في نظرية الأوتار، لكنها تنشأ من تذبذبات وتر ما. وتنشأ الجسيمات المختلفة من التذبذبات المختلفة، مثلما تنشأ النغمات المتعددة من وتر الكمان إذا اهتزَّ. ونظريًّا، من المفترض أن تتألَّفَ الأدلة التجريبية التي تثبت نظرية الأوتار من جسيمات جديدة تتماشى مع أوضاع الاهتزاز الإضافية الكثيرة التي يمكن أن تصدر عن وترٍ ما.

لكن معظم هذه الجسيمات تكون أثقل بكثير على الأرجح مما يمكن رصده، ولهذا يصعب للغاية التحقُّق مما إذا كانت نظرية الأوتار تنطبق على الطبيعة أم لا. فتصف معادلات نظرية الأوتار الأجسام المتناهية الدقة التي تحمل قدرًا هائلًا من الطاقة، الأمر الذي يجعل من المستبعد على أي كاشف يمكننا تصوره أن يراها. وتتحقق هذه النظرية عند نطاق طاقة يزيد ١٠ مليارات مليون مرة عن النطاق الذي يمكننا استكشافه بالتجارب باستخدام الأدوات المتوفرة حاليًّا. وفي الوقت الحاضر، ما زلنا لا نعلم حتى الآن ما سيحدث عندما تزيد طاقة مصادمات الجسيمات بمقدار عشر مرات.

لا يمكن لعلماء نظرية الأوتار التنبُّؤ على نحوٍ فذٍّ بما يحدث في نطاق الطاقات التي يمكن بلوغها تجريبيًّا؛ لأن محتوى الجسيمات وغير ذلك من خصائصها الأخرى يعتمد على التركيب غير المحدَّد بعدُ للمكونات الأساسية في النظرية. ونتائج نظرية الأوتار في الطبيعة تعتمد على كيفية تنظيم العناصر نفسها. وفي الصياغة الحالية، تشتمل نظرية الأوتار على عدد من الجسيمات والقوى والأبعاد أكبر مما نراه في العالم من حولنا، والسؤال الذي يطرح نفسه هنا هو: ما الذي يميِّز الجسيمات والقوى والأبعاد المرئية عن الأخرى غير المرئية؟

على سبيل المثال، الفضاء في نظرية الأوتار ليس هو بالضرورة الفضاء الذي نراه من حولنا؛ أي الفضاء الثلاثي الأبعاد. بدلًا من ذلك تصف الجاذبية وفق هذه النظرية فضاءً ذا أبعاد إضافية تصل إلى ستة أو سبعة أبعاد مكانية تختلف عن الثلاثة التي نعرفها. وبقدر ما تتسم به نظرية الأوتار من جوانب مذهلة ومتميزة، فإن الخصائص المحيرة، مثل الأبعاد الإضافية، تجعل من الصعب ربطها بالكون المرئي.

وللوصول من الطاقة العالية التي تتحقَّق في إطارها نظريةُ الأوتار إلى التنبؤات عن الطاقات القابلة للقياس، نحتاج لاستنتاج ما ستبدو عليه النظرية الأصلية عند استبعاد الجسيمات الأثقل وزنًا. لكن هناك العديد من الجوانب المحتملة لتجلِّي نظرية الأوتار عند طاقات يمكن بلوغها، ولا نعلم حتى الآن كيف نميِّز بين القدر الهائل من الاحتمالات، أو حتى كيف نعثر على الاحتمال الذي يتشابَه مع عالمنا. والمشكلة هي أننا لم نفهم بعدُ نظريةَ الأوتار بالقدر الكافي لاستقاء نتائجها عند الطاقات التي نراها. فتعقُّد النظرية يحول دون التنبؤ بنتائجها. والصعوبة هنا لا تقتصر على الجانب الرياضي فحسب، وإنما تتمثل أيضًا في عدم وضوح الكيفية التي يمكن بها تنظيم مكونات نظرية الأوتار وتحديد المسألة الرياضية المراد حلها.

وفوق كل ذلك، فإننا نعلم الآن أن نظرية الأوتار أكثر تعقيدًا بكثير مما كان يظنه الفيزيائيون في البداية، وتتضمن قدرًا أكبر من المكونات الأخرى ذات التعددية البعدية المختلفة، لا سيما الأغشية. لا يزال اسم نظرية الأوتار مستخدَمًا، لكن الفيزيائيين يتحدثون أيضًا عن «النظرية M»، وإن لم يكن أحد يعلم حقًّا ما يشير إليه الحرف M.

نظرية الأوتار نظرية مذهلة أدَّتْ بالفعل إلى مدارك فيزيائية ورياضية عميقة، ويمكن أن تشتمل أيضًا على المكونات الصحيحة لوصف الطبيعة في النهاية. لكن للأسف، ثمة فجوة نظرية هائلة تفصل النظرية كما هي مفهومة حاليًّا عن التنبؤات التي تصف عالمنا.

وفي النهاية، إذا كانت نظرية الأوتار صحيحة، يجب أن تكون جميع النماذج التي تصف ظواهر العالم الحقيقي قابلةً للاستنتاج من الأسس الجوهرية لها، لكن الصياغة الأولية مجردة، وارتباطها بالظواهر القابلة للملاحظة بعيد. وينبغي أن نكون محظوظين للغاية لكي نعثر على المبادئ الفيزيائية السليمة التي ستجعل تنبؤات نظرية الأوتار تتماشَى مع العالم من حولنا، وهذا هو الهدف النهائي لنظرية الأوتار، لكنها مهمة شديدة الصعوبة.

مع أن الأناقة والبساطة يمكن أن تكونا علامتين مميزتين للنظريات الصحيحة، فلا يمكننا الحكم على جمال النظرية حقًّا إلا عندما يتشكَّل لدينا فهم شامل لكيفية عملها. واكتشافُ كيف ولماذا تخفي الطبيعة الأبعاد الإضافية التي تشير نظرية الأوتار إلى وجودها يمكن أن يمثِّل إنجازًا مُدهِشًا، والفيزيائيون يرغبون في التوصُّل إلى كيفية حدوث ذلك.

المشهد الطبيعي

من الدعابات التي تضمَّنَها كتاب «الطرق الملتوية» تشبيه معظم محاولات إضفاء الواقعية على نظرية الأوتار بالجراحة التجميلية. فلكي تتوافَق نظرية الأوتار مع عالمنا، لا بد أن يجد الفيزيائيون النظريون سبيلًا لإخفاء الأجزاء التي من المفترض عدم وجودها، مستبعدين بذلك الجسيمات والأبعاد غير المرغوب فيها. لكن رغم أن مجموعات الجسيمات الناتجة عن ذلك تكون قريبة للغاية من المجموعة الصحيحة، فلا يمكننا مع ذلك الجزم بصحتها.

والمحاولات الأحدث عهدًا لإضفاء الواقعية على نظرية الأوتار تشبه تجارب الأداء الفني، فبالرغم من أن أغلب مَن يخوضون هذه التجارب لا يمكنهم التمثيل جيدًا، وبعضهم تخلو وجوههم من أي تعبير، يمكن أن يظهر من بينهم ممثل وسيم وموهوب عند إجراء مجموعة كافية من تجارب الأداء.

وبالمثل، تعتمد بعض الأفكار المتعلقة بنظرية الأوتار على أن الكونَ تكوينٌ نادر — لكنه مثالي — من العناصر. وحتى إذا وحدت نظرية الأوتار في النهاية جميع القوى والجسيمات المعروفة، فقد تحتوي على مجموعة واحدة مستقرة تمثِّل مجموعة معينة من الجسيمات والقوى والتفاعلات، أو على الأرجح تحتوي على مشهد طبيعي أكثر تعقيدًا يتألَّف من العديد من الأودية والتلال الممكنة، ومجموعة متنوعة من الآثار المحتملة أيضًا.

وتشير الأبحاث الحديثة إلى أن نظرية الأوتار يمكن أن تتجسد على شكل العديد من الأكوان المحتملة في سيناريو يتوافَق مع مفهوم «الكون المتعدد»، ويمكن للأكوان المختلفة أن تكون بعيدة بعضها عن بعض على نحو يَحُول دون تفاعلها على الإطلاق — حتى من خلال الجاذبية — على مدار أعمارها، وفي هذه الحالة يمكن أن يحدث تطوُّر مختلف كليةً في كل كون من هذه الأكوان، ولا يتبقَّى منها سوى كون واحد فقط.

وإذا كانت هذه الأكوان موجودة بالفعل، ولم يكن هناك سبيل لإشغالها، فلنا الحق في تجاهلها جميعًا ما عدا الكون الذي نعيش فيه. لكن التطور الكوني يقدِّم سُبُلًا لتكوين جميع هذه الأكوان. والأكوان المختلفة يمكن أن تختلف اختلافًا هائلًا من حيث خصائصها المتمثلة في المادة أو القوى أو الطاقة.

يستخدم بعض الفيزيائيين فكرةَ المشهد الطبيعي مع «المبدأ الإنساني» لمحاولة التعامل مع المسائل الشائكة في نظرية الأوتار وفيزياء الجسيمات. ويشير المبدأ الإنساني إلى أنه بما أننا نعيش في كون يسمح بوجود المجرات والحياة، يجب أن تحمل مؤشرات معينة القِيَم التي تحملها أو قِيَمًا قريبة منها، وإلا فما كنَّا لنتواجَد الآن لنطرح هذا السؤال. على سبيل المثال، لا يمكن للكون أن يحتوي على قدر هائل من الطاقة يجعله يتمدَّد بمعدل سريع للغاية يجعل المادة تنهار في البنى الكونية.

وإذا كان هذا هو الوضع، يلزم علينا تحديد أي الخصائص الفيزيائية يرجِّح تركيبًا معينًا — هذا إن وُجِد — للجسيمات والقوى والطاقة على تركيب آخَر. لكننا لا نعلم حتى أي الخصائص من المفترض أن تكون قابلةً للتنبؤ بها، وأيها ضرورية لوجودنا في المقام الأول. أي الخصائص لها تفسيرات أساسية؟ وأيها لا تتعدَّى كونها مصادَفة؟

أنا شخصيًّا أومِن باحتمالية وجود مشهد طبيعي يحمل تكوينات عديدة محتملة يمكننا الوجود فيها؛ لأن هناك العديد من الحلول الممكنة لأي مجموعة من معادلات الجاذبية التي نضعها، ولا أرى سببًا يجعل ما يحتويه هذا الكون قاصرًا على ما نراه فقط، لكنني لا أرى أن استخدام المبدأ الإنساني كوسيلة لتفسير الظواهر المرصودة كافيًا. والمشكلة تكمن في أنه لا يمكننا أبدًا معرفة ما إذا كان المبدأ الإنساني كافيًا أم لا. أي الظواهر من المفترض أن نتمكن من التنبؤ بها؟ وأيها تحدث لأن «هكذا تجري الأمور» فقط؟ وفوق كل ذلك، التفسير الإنساني لا يمكن اختبار صحته؛ فقد يكون صحيحًا، لكنه سيُستبعَد بالتأكيد إذا ظهَرَ تفسيرٌ أكثر جوهريةً من المبادئ الأولى.

العودة إلى أرض صلبة

من المرجح أن تحتوي نظرية الأوتار على بعض الأفكار العميقة الواعدة، وقد قدَّمَتْ لنا بالفعل معلوماتٍ دقيقةً عن جاذبية الكم والرياضيات، هذا فضلًا عن تقديمها مكونات مثيرة للاهتمام يمكن لواضعي النماذج تتبُّعها، لكننا سنستغرق على الأرجح وقتًا طويلًا حتى نتمكَّنَ من حلِّ النظرية على نحوٍ يسمح بالإجابة عن المسائل التي من المرجح أن

نحلها. واستقاء نتائج نظرية الأوتار في العالم الواقعي من الصفر قد يكون أمرًا بالغَ الصعوبة، وحتى إن نشأت النماذج الناجحة في النهاية من نظرية الأوتار، فإن فوضى العناصر غير الضرورية تجعل من الصعوبة بمكان العثور عليها.

وما يدعم منهج بناء النماذج في الفيزياء هو فكرة أن الطاقاتِ التي تُجري عنها نظريةُ الأوتار تنبؤاتٍ محددةٍ بعيدةٌ للغاية عن الطاقات التي نرصدها. فكما هو الحال مع الكثير من الظواهر التي تختلف في أوصافها وفقًا للنطاق، قد يكون من الأفضل تناوُلُ المسائل في فيزياء الجسيمات عند الطاقات الملائمة لنا.

يتقاسم الفيزيائيون أهدافًا مشتركة، لكنهم يختلفون في توقعاتهم بشأن أفضل سُبُل تحقيق هذه الأهداف، وأنا شخصيًّا أفضِّل أسلوب بناء النماذج؛ نظرًا لأنه من المرجح أن تتلقى النماذج توجيهًا تجريبيًّا في المستقبل القريب. وقد أستخدمُ أنا وزملائي أفكارًا مستقاة من نظرية الأوتار، وقد يكون لأبحاثنا بعض التبعات المرتبطة بهذه النظرية، لكن تطبيقها ليس هو هدفي الأساسي؛ فهدفي هو فهم الظواهر القابلة للاختبار. ومن الممكن وصف النماذج وإخضاعها للاختبارات التجريبية، حتى قبل ربطها بأي نظرية جوهرية.

يقر واضعو النماذج أنه لا يمكننا استنتاج كل شيء في آنٍ واحد؛ فافتراضات نموذج ما يمكن أن تمثِّل جزءًا من النظرية الأساسية النهائية، أو يمكن أن توضِّح ببساطة العلاقات الجديدة التي تظل تحمل معانيَ نظريةً أكثر عمقًا. والنماذج نظريات فعَّالة، وبمجرد أن تَثبُت صحة نموذجٍ ما، يمكن أن يقدِّم التوجيه لعلماء نظرية الأوتار، أو أي شخص آخَر يحاوِل التركيز على الأسلوب التنازلي. وتنتفع النماذج بالفعل من مجموعة كبيرة من الأفكار التي تطرحها نظرية الأوتار، لكنها تركِّز بشكل أساسي على الطاقات المنخفضة والتجارب التي تنطبق عند هذه النطاقات.

والنماذج التي تتجاوز حدود النموذج القياسي تضم مكونات ونتائج عند طاقات استُكشِفت بالفعل، لكنها تحتوي أيضًا على قوًى وجسيمات وتفاعلات جديدة يمكن رؤيتها فقط عند مسافات أقصر. ومع ذلك، فإن مواءمة كل شيء نعرفه أمر صعب، والنموذج الدقيق الناتج الذي أعمل عليه أنا أو أي شخص آخَر يفقد غالبًا قدرًا كبيرًا من جماله الأولي. ولهذا السبب ينبغي أن يتمتع واضعو النماذج بذهن متفتح.

يندهش الناس عادةً عندما أخبرهم بأنني أعمل على الكثير من النماذج المختلفة رغم علمي بأنها لا يمكن أن تكون جميعها صحيحة، وأنه من المفترض أن يوضِّح لنا

مصادم الهادرونات الكبير أيها صحيح. وتزداد دهشتهم عندما أوضِّح لهم أنني لا أضع بالضرورة قدرًا كبيرًا من الاحتمالات لأي نموذج محدَّد أفكر فيه، لكنني أختار المشروعات التي توضِّح مبدأً تفسيريًّا جديدًا بحق أو نوعًا جديدًا من البحث التجريبي. والنماذج التي أتناولها تكون لها خاصية أو آلية معيَّنَة مثيرة للاهتمام تقدِّم تفسيرات محتملة مهمة للظواهر الغامضة. ومع الوضع في الاعتبار الأمور الكثيرة المجهولة — ومعايير التطور غير المؤكدة — يفرض توقُّع الحقيقة وتفسيرها تحديات هائلة، وسيكون من المُعجِز حلُّ جميع هذه التحديات من البداية.

من الجوانب الجميلة لنظريات الأبعاد الإضافية أنها تجمع أفكارًا من الأسلوبين التنازلي والتصاعدي. فقد أدرك علماء نظرية الأوتار الدورَ المحوريَّ للأغشية في الصيغ النظرية التي وضعوها، وأدرك واضعو النماذج أنه من خلال إعادة تفسير مشكلة التسلسل الهرمي كمسألة عن الجاذبية، يمكن أن يجدوا حلولًا بديلة.

يختبر مصادم الهادرونات الكبير هذه الأفكار الآن، وأيًّا كان ما سيكتشفه فإنه سيوجه بناء النماذج ويقيِّده في المستقبل. ومن خلال نتائج التجارب العالية الطاقة التي سيجريها المصادم، سنتمكَّن من جمع الملاحظات معًا لتحديد أيها الصحيح، وحتى إن لم تتفق الملاحظات مع مقترح واحد معين، فإن الدروس التي تعلَّمناها من بناء هذه النماذج ستساعدنا في تضييق نطاق الاحتمالات لنجاح النظرية.

يساعدنا بناء النماذج في تحديد الاحتمالات، واقتراح حلول تجريبية، وتفسير البيانات بمجرد توفرها، وقد يحالفنا الحظ ونصل إلى الحل، لكن بناء النماذج يمنحنا أيضًا معلومات دقيقة حول ما نبحث عنه، وسوف تساعدنا هذه التنبؤات في استنتاج تبعات أي نتيجة تجريبية جديدة، حتى إن لم تثبت صحة أي من تنبؤات النموذج بشكل كامل. والنتائج سوف تميِّز بين العديد من الأفكار وتحدِّد التبعات — إن وُجِدت — التي تصف الواقع وصفًا صحيحًا. وفي حال عدم نجاح أي اقتراح حالي، ستساعدنا البيانات مع ذلك في تحديد النموذج الذي من المحتمل أن يكون صحيحًا.

إن التجارب العالية الطاقة لا تبحث عن الجسيمات الجديدة فقط، وإنما تبحث عن بنية القوانين الفيزيائية الأساسية مع قدر أكبر من القدرة التفسيرية. وإلى أن تساعدنا التجارب في التوصل إلى إجابات، يقتصر ما نفعله على التخمينات، وسوف نطبِّق الآن المعايير الجمالية (أو التحيُّز) لتفضيل نماذج معينة، لكن عندما تصل التجارب إلى الطاقات أو المسافات والإحصائيات اللازمة للتمييز بين النماذج، سوف نعرف المزيد من

المعلومات. والنتائج التجريبية — مثل التي نأمل في أن يقدِّمها لنا مصادم الهادرونات الكبير — ستحدِّد لنا أي التخمينات هو الصحيح، وتساعدنا في إثبات الطبيعة الأساسية للواقع.

الجزء الخامس

تقدير نطاق الكَوْن

الفصل التاسع عشر

رحلة نحو الخارج

عندما كنتُ في المرحلة الابتدائية، استيقظتُ ذات صباح على خبر مُحيِّر، وهو أن الكَوْن (على الأقل وفق مداركنا) قد زاد عمره فجأةً بمقدار مرتين. أدهشني الخبر؛ كيف يمكن لشيء في أهمية عمر الكَوْن أن يكون عرضة للتغيير على هذا النحو الجذري دون أن يدمِّر ذلك أي خصائص أخرى نعرفها عنه؟

أما الآن، فدهشتي يثيرها عكس ذلك؛ إذ يذهلني مدى الدقة التي يمكننا بها الآن قياس الكون وتاريخه، ولا يقتصر الأمر على أننا نعرف الآن عمر الكون بدقة أكبر بكثير من ذي قبل فحسب، وإنما صرنا نعلم أيضًا كيف نما الكون مع الوقت، وكيف تكوَّنَتِ النوى، وكيف بدأت المجرات وعناقيدها في التطور. في الماضي، كان لدينا تصوُّر نوعي لما حدث، أما الآن فصار لدينا تصوُّر علمي دقيق لذلك.

لقد دخل علم الكونيات عهدًا مميَّزًا عُجِّلت فيه التطورات الثورية — سواء على المستوى النظري أو التجريبي — بالتوصُّل إلى وصف أكثر شمولًا وتفصيلًا مما كان لأحد أن يتصوَّره قبل عشرين عامًا من الآن. وبالجمع بين الأساليب التجريبية المتطورة والحسابات القائمة على النسبية العامة وفيزياء الجسيمات، رسم الفيزيائيون صورةً لما كان عليه الكون في المراحل المبكرة من عمره وكيفية تطوُّره إلى ما أصبح عليه الآن.

ولقد انصبَّ تركيزنا حتى الآن في هذا الكتاب على النطاقات الصغيرة التي ندرس في إطارها الطبيعةَ الداخليةَ للمادة، وبعد وصولنا إلى هذا الحد من رحلتنا نحو الداخل، أدعوكم لاستكمال رحلتنا بالنطاقات البعيدة التي بدأ الفصل الخامس من هذا الكتاب في تناولها، لنَتَّجِهَ معًا نحو الخارج، مستكشفين أحجام الأجسام في الكون الخارجي.

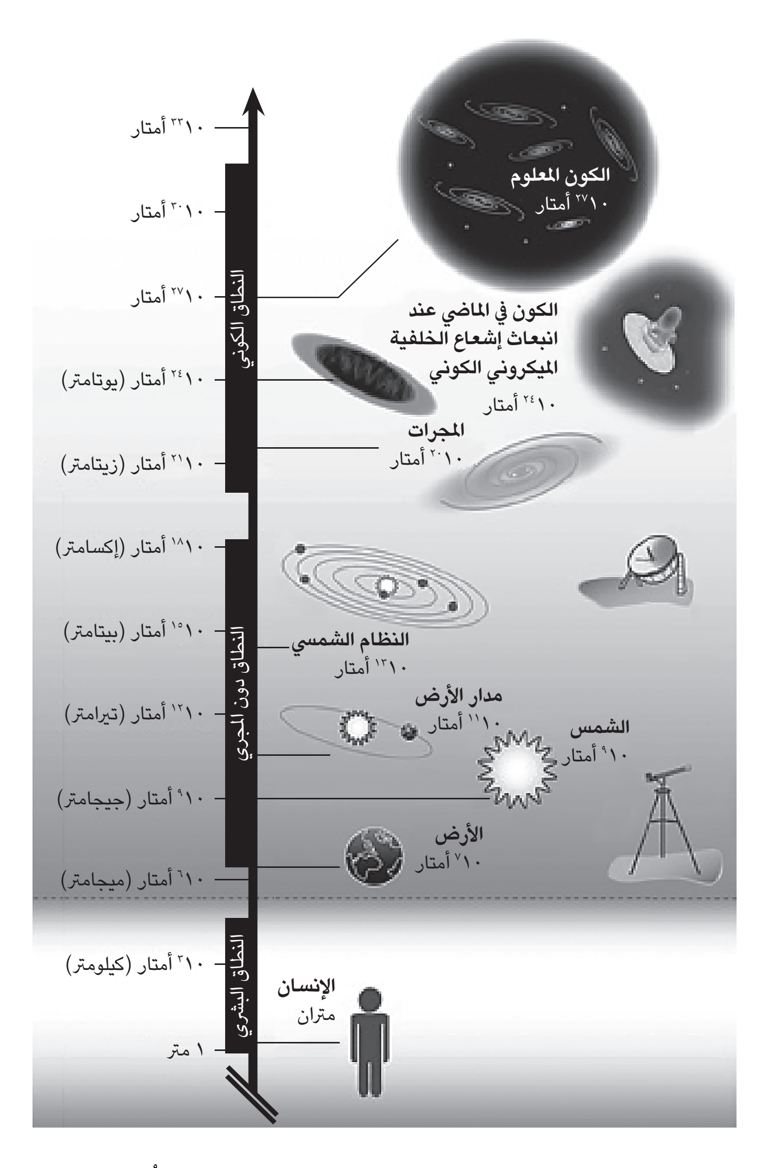
لكن ينبغي أن ننتبه إلى أن هناك فارقًا كبيرًا في هذه الرحلة نحو النطاقات الكونية، وهو أنه لا يمكننا تقديم وصف دقيق لجميع ملامح الكون بناءً على الحجم فقط؛

فعمليات الرصد لا تسجِّل حالةَ الكون الآن فحسب، وإنما تستعرض كذلك المراحل الزمنية السابقة؛ وذلك بسبب سرعة الضوء المحدودة. ومن ثَمَّ، فإن البِنى التي نرصدها الآن يمكن أن تكون من عناصر الكون في مراحله المبكرة، لكنَّ ضوءها وصل إلى التليسكوبات التي نستخدمها بعد مليارات السنين من انبعاثه. والحجم الحالي الذي نراه الآن للكون، المتمدِّد تمددًا هائلًا، يفوق حجمه في السابق مرات عدة.

ومع ذلك، فإن الحجم يلعب دورًا محوريًّا في وصف ملاحظاتنا، سواء للكون الحالي أو تاريخه على مدار الزمن، وسيتناول هذا الفصل كلا الأمرين. في النصف الثاني منه، سنتناول تطوُّرَ الكون بأكمله من حجمه الأولي الدقيق، وصولًا إلى البنية الهائلة التي نلاحظها الآن. لكننا سنلقي أولًا نظرة على الكون كما يبدو لنا الآن كي نتعرَّفَ على بعض الأطوال التي تميِّزُ ما يحيط بنا، ثم ننتقل إلى المستويات الأعلى من النطاقات لنتناول الأحجام الأكبر والأجسام الأبعد — سواء على الأرض أو في النظام الكوني — لنتعرَّفَ على أنواع البنى الأكبر حجمًا التي سنستكشفها. وهذه الجولة في النطاقات الكبيرة ستكون أقصر في مدتها من رحلتنا السابقة إلى داخل المادة، فرغم الثراء البنيوي للكون، أغلب ما نراه فيه يمكن تفسيره باستخدام القوانين الفيزيائية المعروفة، دون الحاجة إلى قوانين أساسية جديدة. فتكوين النجوم والمجرات يعتمد على القوانين الكيميائية والكهرومغناطيسية المعروفة؛ أي العلم المتأصِّل في النطاقات الصغيرة التي تناولناها فيما سبق، لكن الجاذبية تلعب الآن دورًا محوريًّا أيضًا، وأفضل وصف للكون من شأنه أن يعتمد على سرعة الأجسام التي تؤثِّر عليها الجاذبية وكثافتها؛ وهو ما يؤدِّي إلى أوصاف نظرية متباينة في هذه الحالة أيضًا.

جولة في الكَون

إن كتاب «أضعافًا مضاعفة»[1] والفيلم المقتبَس عنه — اللذين يقدِّمان جولةً مميَّزَة داخل نطاقات المسافات — يبدآن وينتهيان بمشهد يجمع بين شخصين يجلسان في حديقة «جرانت بارك» في شيكاجو، وهذا هو المكان الأمثل لبدء رحلتنا. فلنتوقف لحظات على أرض صلبة (نعرف الآن أنها في معظمها غير مصمتة) لنرى الأطوال والأحجام المألوفة المحيطة بنا، وبعد أن نتأمَّلَ النطاق البشري لارتفاع نحو مترين، سنترك هذا المكان المريح ونصعد إلى أحجام أكبر وارتفاعات أعلى. (انظر الشكل ١٩-١ للاطِّلَاع على نماذج النطاقات التي سنتناولها في هذا الفصل.)



شكل ١٩-١: جولة في النطاقات الكبيرة، مع توضيح لوحدات الطول المُستخدَمة في وصف هذه النطاقات.

أحد أكثر العروض الرائعة التي رأيتها على الإطلاق لردِّ الفعل البشري تجاه الارتفاع كان ذلك العرض الذي قدَّمَتْه فرقة رقص إليزابيث ستريب، وفيه سقط الراقصون (أو «مهندسو الحركات») على بطونهم من على قضيب أخذ يرتفع أكثر فأكثر حتى جاء سقوط الراقص الأخير من على ارتفاع ٣٠ قدمًا كاملة. يتجاوز ذلك بالطبع حدود «منطقة الراحة» لدينا؛ الأمر الذي عكسه انقطاع أنفاس الجماهير بوضوح؛ فليس من المفترض أن يسقط الناس من على هذا الارتفاع، وبالتأكيد ليس على وجوههم.

تثير كذلك المباني الطويلة لدينا ردودَ أفعال قوية تتراوح ما بين الإعجاب والاغتراب؛ لذا من أصعب التحديات التي يواجهها المهندسون المعماريون هو إضفاء الطابع البشري على الهياكل الأكبر بكثير من حجم الإنسان. وتتنوع المباني والهياكل في حجمها وشكلها، لكن ردَّ فعلنا تجاهها يعكس حتمًا توجُّهاتنا النفسية والفسيولوجية تجاه الحجم.

إن أعلى بناء من صنع الإنسان في العالم هو برج خليفة في دبي بالإمارات العربية المتحدة، ويبلغ ارتفاعه ٨٢٨ مترًا (٢٧١٧ قدمًا). هذا ارتفاع مهول، لكن البرج يكاد يخلو من السكان، ولن يمنحه على الأرجح الجزء الرابع من فيلم «مهمة مستحيلة» نفس المكانة الثقافية التي منحها فيلم «كينج كونج» لمبنى إمباير ستيت. يقف هذا البناء المميز الذي يصل ارتفاعه ٣٨١ مترًا في مدينة نيويورك، ويبلغ ارتفاعه نصف ارتفاع برج خليفة، لكن ما يميِّزه أن نسبة إشغاله أعلى بكثير.

لكننا نعيش في عالم تحيط بنا فيه كيانات طبيعية أكبر بكثير من هذه المباني. على المستوى الرأسي، يُعَدُّ جبل إفرست البالغ ارتفاعه ٨٫٨ كيلومترات أعلى قمة على الإطلاق على سطح الأرض، أما جبل مون بلون الأعلى في أوروبا (على الأقل إذا لم تكن من دولة جورجيا)، فيبلغ ارتفاعه نصف ارتفاع جبل إفرست. ومع ذلك، شعرتُ بسعادة بالغة عندما وصلت إلى قمته، وإنْ بدا عليَّ الإرهاقُ الشديد في صورةٍ لي مع أحد أصدقائي عند وصولنا إلى القمة. وعلى عمق ١١ كيلومترًا تحت الماء، يُعَدُّ أخدود ماريانا أعمق مكان على الإطلاق في المحيط، وأكثر مواطن القشرة الأرضية انخفاضًا. وقد كان هذا الأخدود — الذي ينتمي لعالم غير عالمنا — وجهة المخرج جيمس كاميرون بعد أن أنهى بنجاح التصوير الثلاثي الأبعاد لفيلمه الشهير «آفاتار» في إحدى الرحلات التي قام بها.

تنتشر الأجسام الطبيعية على سطح الأرض لمسافات هائلة. المحيط الهادئ، على سبيل المثال، يبلغ عرضه ٢٠ مليون متر، بينما يبلغ عرض روسيا — الذي يساوي ثمانية ملايين متر — أقل من نصف ذلك تقريبًا. يساوي قطر الأرض أيضًا

نحو ١٢ مليون متر، ومحيطها ثلاثة أضعاف ذلك. أما الولايات المتحدة الأمريكية، فيبلغ عرضها — الذي يساوي ٤٫٢ ملايين متر — عُشْر ذلك المحيط، لكنه يظل مع ذلك أكبر من قطر القمر البالغ طوله ٣٫٦ ملايين متر.

على الجانب الآخَر، تتنوع أحجام الأجسام في الفضاء الخارجي تنوُّعًا كبيرًا أيضًا. فثمة تنوُّعٌ هائلٌ، مثلًا، في حجم الكويكبات، حيث الصغيرة منها بحجم الحصى، بينما الكبيرة أكبر بكثير من أي شيء موجود على سطح الأرض. أما الشمس، فيبلغ قطرها نحو مليار متر؛ ومن ثَمَّ يزيد قطرها عن قطر الأرض حوالي مائة مرة، والنظام الشمسي — الذي سأفترض أن مساحته تمتد من الشمس إلى بلوتو (الموجود في النظام الشمسي، سواء أكان سيُمنَح صفة الكوكب أم لا) — يفوق نصف قطر الشمس بحوالي ٧ آلاف مرة.

والمسافة من الأرض إلى الشمس أصغر نسبيًّا؛ إذ لا تزيد عن ١٠٠ مليار متر؛ أي ما يساوي واحدًا من مائة ألف من السنة الضوئية، والسنة الضوئية هي المسافة التي يمكن أن يقطعها الضوء في عام واحد، وتساوي حاصل ضرب ٣٠٠ مليون متر/الثانية (سرعة الضوء) في ٣٠ مليون ثانية (عدد الثواني في العام). ونظرًا لهذه السرعة المحدَّدة للضوء، يكون عمر الضوء الذي يصلنا من الشمس حوالي ثماني دقائق.

يحتوي كوننا الضخم على العديد من البِنى المرئية التي تتبايَن في أحجامها وأشكالها، وقد نظم علماء الفلك الأجرام النجمية حسب نوعها. وتحديدًا للنطاق، يبلغ حجم المجرات في المعتاد نحو ٣٠ ألف سنة ضوئية أو ما يساوي ٣ × ١٠^{٢٠} أمتار. يشمل ذلك مجرتنا — درب التبانة — التي يساوي حجمها حوالي ثلاثة أضعاف هذا الحجم، أما العناقيد المجرية — التي تحتوي على عدد من المجرات يتراوح من العشرات إلى الآلاف — فيبلغ حجمها نحو ١٠^{٢٣} أمتار؛ أي ما يساوي ١٠ ملايين سنة ضوئية ويستغرق الضوء حوالي ١٠ ملايين عام للعبور من أحد طرفي العنقود المَجَرِّيِّ إلى الطرف الآخَر.

لكن رغم التنوع الهائل في أحجام هذه الأجرام، تخضع أغلبها لقوانين نيوتن. فيمكن تفسير مدار القمر، شأنه شأن مدار كوكب بلوتو أو حتى الأرض نفسها، وفق جاذبية نيوتن. وبناءً على المسافة التي يبعدها الكوكب عن الشمس، يمكن التنبؤ بمداره باستخدام قانون نيوتن لقوة الجاذبية، وهو نفس القانون الذي تسبَّبَ في سقوط التفاحة التي لاحَظَها هذا العالِم على الأرض.

رغم ذلك، كشفت القياسات الأكثر دقة لمدارات الكواكب عن أن قوانين نيوتن ليست حاسمة في هذا الشأن؛ فنحن بحاجة إلى النسبية العامة لتفسير دقة الحضيض الشمسي

لكوكب عطارد، وهو التغير الملحوظ في مدار كوكب عطارد حول الشمس بمرور الزمن. والنسبية العامة نظريةٌ أكثر شمولًا تشمل قوانين نيوتن عندما تكون الكثافات منخفضة والسرعات صغيرة، لكنها تسري أيضًا خارج نطاق هذه الحدود.

ومع ذلك، فإن النسبية العامة ليست ضرورية لوصف أغلب الأجسام، لكن آثارَها يمكن أن تتراكم مع الوقت، وتتضح عندما تكون الأجسام كثيفة بالقدر الكافي، كما هو الحال مع الثقوب السوداء. والثقب الأسود الموجود في منتصف مجرتنا يبلغ نصف قطره نحو ١٠ تريليونات (١٠^١٣) متر. والكتلة التي يضمها ضخمة؛ إذ تفوق كتلة الشمس بحوالي ٤ ملايين مرة. وكما هو الحال مع جميع الثقوب السوداء الأخرى، تتطلب هذه الكتلة النسبية العامة لوصف خصائص جاذبيتها.

تبلغ مساحة الكون المرئي بأكمله حاليًّا ١٠٠ مليار سنة ضوئية؛ أي ١٠^٢٧ أمتار، وهو ما يفوق حجم مجرتنا مليون مرة. وهذه مساحة هائلة ومدهشة من الناحية الظاهرية؛ إذ إنها أكبر من المسافة التي يمكننا رصدها فعليًّا، وهي ١٣٫٧٥ مليارات سنة منذ وقوع الانفجار العظيم. ليس من المفترض أن ينتقل أي شيء بسرعة تفوق سرعة الضوء؛ ومن ثَمَّ، نظرًا لأن الكون لا يتجاوز عمره ١٣٫٧٥ مليارات عام، فقد يبدو هذا الحجم مستحيلًا.

لكن في الواقع لا يوجد تناقض كبير في ذلك؛ فالسبب وراء أن الكون بأكمله أكبر من المسافة التي يمكن لإشارة قطعها وفقًا لعمرها هو أن الفضاء نفسه يتمدَّد. وتلعب النسبية العامة دورًا كبيرًا في فهم هذه الظاهرة؛ إذ توضِّح لنا معادلاتها أن بنية الفضاء ذاتها قد تمدَّدت؛ ومن ثَمَّ، يمكننا رصد أماكن في الكون تبعد عنَّا بهذا القدر، رغم أنه يستحيل عليها رؤية بعضها البعض.

ومع الأخذ في الاعتبار سرعة الضوء وعمر الكون المحدود، ينقلنا هذا القسم الآن إلى حد الأحجام الملحوظة. فالكون المرئي هو ما يمكن للتليسكوبات التي نستخدمها الوصول إليه، مع ذلك فإن حجم الكون لا يقتصر بالتأكيد على ما يمكننا رؤيته. وكما هو الحال مع النطاقات الصغيرة — التي يمكننا تخمين بعض الأمور بشأنها بما يتجاوز الحدود التجريبية الحالية — يمكننا أيضًا التفكير فيما يوجد خارج نطاق الكون القابل للرصد. وما من حدود لأكبر الأحجام التي يمكننا تصوُّرها سوى مخيلتنا وصبرنا على التفكير في البنية التي لا يمكننا أن نأمل حتى في رصدها.

إننا لا نعلم حقًّا ما يوجد خارج «الأفق»؛ أي حدود الكون القابل للرصد. وحدود ملاحظاتنا تسمح بإمكانية وجود ظواهر جديدة وعجيبة خارج هذا النطاق. والبِنى

المختلفة، والأبعاد المتباينة، بل قوانين الفيزياء المختلفة أيضًا، يمكن — من الناحية النظرية — أن تنطبق طالما أنها لا تتناقض مع ما تَمَّ رصده، ولا يعني ذلك أن كل احتمال يتحقَّق في الطبيعة، كما يؤكِّد أحيانًا زميلي الفيزيائي الفلكي، ماكس تجمارك، لكنه يعني أن هناك احتمالات عديدة لما يمكن أن يكون موجودًا فيما وراء الأفق.

لا نعلم إلى الآن إذا كان هناك وجود لأي أبعاد أو أكوان أخرى أم لا، ولا يمكننا أيضًا في الواقع التأكيد على أن الكون محدود أو غير محدود، وإن كان أغلبنا يعتقد أنه غير محدود. فما من قياس يوضح أي علامة على نهاية الكون، لكن القياسات لا تزال محدودة. ومن الناحية النظرية، يمكن أن يكون للكون نهاية، أو أن يكون على شكل الكرة أو بالون، لكن ما من دليل نظري أو تجريبي يثبت ذلك في الوقت الحالي.

يفضِّل معظم الفيزيائيين عدم التفكير كثيرًا في النظام الذي يوجد خارج حدود الكون المرئي؛ لأننا على الأرجح لن نعلم ذلك أبدًا، ومع ذلك فإن أي نظرية عن الجاذبية أو الجاذبية الكمية تمنحنا الأدوات الرياضية اللازمة لتدبر هندسة ما يمكن أن يكون موجودًا خارج هذه الحدود. وبناءً على الأساليب النظرية والأفكار المتعلقة بأبعاد الفضاء الإضافية، يفكِّر الفيزيائيون أحيانًا في وجود أكوان أخرى عجيبة لا تتصل بنا على مدار عمر الكون الذي نعيش فيه، أو تتصل بنا فقط بواسطة الجاذبية. وكما تناولنا في الفصل الثامن عشر، يفكِّر علماء نظرية الأوتار وغيرهم في الأكوان المتعددة التي تشمل العديد من الأكوان المستقلة المنفصلة عن بعضها البعض، والتي تتسق مع معادلات نظرية الأوتار؛ ويدمجون أحيانًا هذه الأفكار مع المبدأ الإنساني الذي يستغل الثروات الممكنة للأكوان المحتمل وجودها. ويصل الأمر بالبعض إلى محاولة الوصول إلى آثار ملحوظة لوجود هذه الأكوان المتعددة في المستقبل. ومن السيناريوهات المميزة في هذا الشأن — والتي أوضحناها في الفصل السابع عشر — سيناريو «الكون المتعدد» المشتمل على غشاءين، والذي قد يساعدنا في فهم المسائل المتعلقة بفيزياء الجسيمات. في هذه الحالة ستكون هناك نتائج قابلة للاختبار، لكن أغلب الأكوان الإضافية — رغم أنه من الممكن تصورها، بل ومن المرجح ذلك أيضًا — ستظل خارج نطاق إمكانية الاختبار التجريبي في المستقبل القريب؛ ومن ثَمَّ ستظل احتمالاتٍ نظرية مجردة.

الانفجار العظيم: تزايد الحجم بمرور الزمن

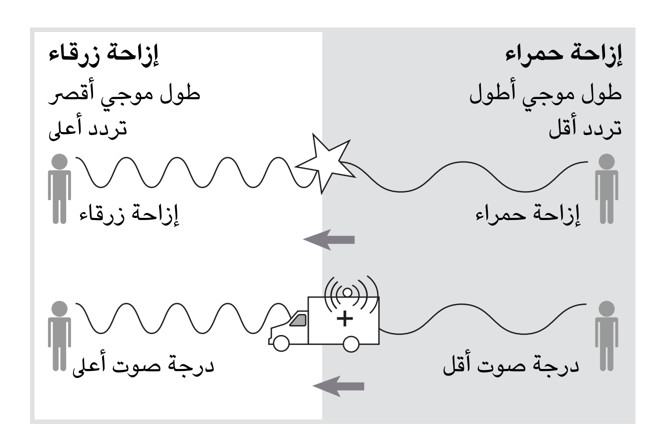
الآن، وبعد أن انتقلنا برحلتنا إلى أكبر الأحجام التي يمكننا رصدها أو مناقشتها في سياق الكون القابل للرصد، ووصلنا إلى الحدود الخارجية لما يمكننا رؤيته (والتفكير فيه باستخدام مخيلتنا)؛ سنستكشف الآن كيف تطوَّرَ الكون الذي نعيش فيه ونرصده على مر الزمن، ليكوِّن البنى الهائلة التي نراها الآن. توضِّح لنا نظرية الانفجار العظيم كيف تطوَّرَ الكون أثناء فترةِ عمره البالغة ١٣٫٧٥ مليار عام من حجمه الصغير الأولي إلى حجمه الحالي البالغ ١٠٠ مليار سنة ضوئية. وقد منح فريد هويل نظرية الانفجار العظيم اسمها مازحًا (ومتشكِّكًا) إشارةً إلى الانفجار الأوليِّ الذي حدث عندما بدأت كرة نار كثيفة ساخنة في التمدد مشكِّلة في النهاية النجوم والبنى الهائلة التي نرصدها الآن، وأثناء تطوُّرها نما حجمها، وخفت كثافة مادتها، وبردت.

لكن الشيء الوحيد الذي لا نعرفه على وجه اليقين هو ما انفجر في البداية وكيف حدث ذلك، أو حتى حجم ذلك الشيء بالضبط عند انفجاره. فبالرغم من فهمنا للتطور المتأخر للكون، لا تزال البدايات محاطة بالغموض. مع ذلك، ورغم أن نظرية الانفجار العظيم لا توضِّح لنا أيَّ شيء عن اللحظة الأولى لميلاد الكون، فهي نظرية ناجحة للغاية تخبرنا بالكثير عن تاريخ الكون اللاحق لتلك اللحظة. والملاحظات الحالية، مصحوبةً بنظرية الانفجار العظيم، توضِّح لنا الكثير عن كيفية تطور الكون.

حتى مطلع القرن العشرين، لم يكن أحد يعلم أن الكون يتمدَّد، وعندما بدأ إدوين هابل بحوثه الفضائية، لم يكن هناك الكثير من الأمور المعلومة. بلغ حجم مجرة درب التبانة، وفق مقياس هارلو شابلي، ٣٠٠ ألف سنة ضوئية، لكنه كان مقتنعًا بأن الكون لا يحتوي إلا على هذه المجرة فقط. وفي عشرينيات هذا القرن، أدرك هابل أن بعض السُّدُم، التي ظنَّها شابلي سحبًا غبارية، هي في الواقع مجرات أخرى تقع على بُعْد ملايين السنوات الضوئية.

وبإثبات هابل وجود مجرات أخرى، يكون قد حقَّق اكتشافه المذهل الثاني؛ ألَا وهو تمدُّد الكون. فلاحَظَ هابل، في عام ١٩٢٩، أن المجرات قد تحرَّكت بالإزاحة الحمراء؛ بمعنى حدوث تأثير دوبلر الذي تكتسب من خلاله الموجات الضوئية أطوالًا موجية أكبر مع ابتعادها في المسافة. وقد أثبتت هذه الإزاحة الحمراء أن المجرات تتراجع مبتعدة، بالضبط كما ينخفض صوت صافرة سيارة الإسعاف العالية مع ابتعادها (انظر الشكل ١٩-٢).

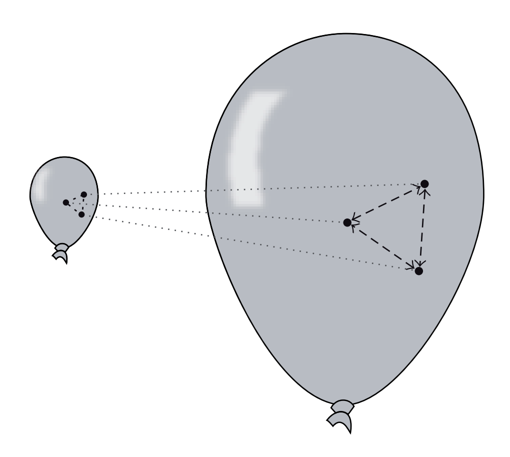
ومن ثَمَّ، فإن المجرات التي تعرَّفَ عليها هابل ليست ثابتةً بالنسبة لموقعنا، وإنما تبتعد عنَّا، وكان ذلك دليلًا على أننا نعيش في كون متمدد تتباعَد فيه المجرات.



شكل ١٩-٢: يتحوَّل الضوء المنبعث من أي جسم يتحرك بعيدًا عنَّا إلى ترددات أقل، أو بعبارة أخرى ينزاح نحو الطرف الأحمر من طيف الضوء. أما الضوء المنبعث من الأجسام التي تقترب منَّا، فيتحوَّل إلى ترددات أعلى، أو ما يسمى بالإزاحة الزرقاء، وهذا أشبه بانخفاض صوت صافرة سيارة الإسعاف عند ابتعادها وارتفاعه عند اقترابها.

يختلف تمدُّد الكون عن الصور التي قد ترد على الذهن للوهلة الأولى؛ نظرًا لأن الكون لا يتمدَّد في مكان موجود بالفعل، فما من شيء آخَر موجود سوى الكون؛ ومن ثَمَّ ليس هناك ما يمكن أن يتمدَّدَ فيه. لكن الكون يتمدَّد، وكذا الفضاء، وأي نقطتين داخله يزداد تباعدهما بمرور الوقت. فالمجرات الأخرى تبتعد عنَّا، لكن ذلك لا يميِّزنا في شيء؛ إذ إنها تبتعد عن بعضها البعض أيضًا.

يمكن تصور ذلك بتخيُّل الكون سطحًا لبالونة. لنفترض أنك رسمت نقطتين على سطح هذه البالونة. عندما تنتفخ، سيتمدَّد سطحها وستبتعد هاتان النقطتان كلٌّ منهما عن الأخرى (انظر الشكل ١٩-٣). وهذا ما يحدث، في الواقع، لأي نقطتين في الكون مع تمدُّده، والمسافة بين هاتين النقطتين — أو أي مجرتين في الكون — تتزايد عند حدوث ذلك.



شكل ١٩-٣: يوضِّح هذا الشكل كيف تتباعَد جميع النقاط بعضها عن بعض مع تمدُّد البالونة (الكون).

جدير بالذكر في هذا التشبيه أن النقاط نفسها لا تتمدَّد بالضرورة، وإنما ما يتمدَّد هو الفضاء بينها. وهذا في الواقع ما يحدث في الكون المتمدد أيضًا. الذرات، على سبيل المثال، ترتبط ببعضها البعض بقوة بواسطة القوى الكهرومغناطيسية، ولا تزيد في حجمها، والأمر نفسه ينطبق على البِنى الكثيفة نسبيًّا المرتبطة بعضها ببعض، مثل المجرات. والقوة الدافعة للتمدد تؤثِّر عليها أيضًا، لكن نظرًا لتأثير قوة أخرى عليها في نفس الوقت، لا يزيد حجم المجرات نفسها مع التمدُّد الكلي للكون، وإنما تستشعر هذه القوى الجاذبة القوية، فتظل بحجمها بينما تتباعَد المسافة النسبية بينها.

لا شك أن تشبيه الكون بالبالونة ليس مثاليًّا، فالكون يحتوي على ثلاثة أبعاد مكانية، وليس اثنين، هذا فضلًا عن أن الكون ضخم، وربما يكون غير محدود في حجمه، وليس صغيرًا ولا منحنيًا مثل سطح البالونة. وفوق كل ذلك، البالونة موجودة داخل الكون وتتمدَّد في فضاء موجود بالفعل، على عكس الكون الذي يتخلَّل الفضاء ولا يتمدَّد في شيء آخَر. لكن حتى مع هذه التحفظات، يظل سطح البالونة إيضاحًا جيدًا لما يعنيه تمدُّد الفضاء، وهو ابتعاد كل نقطة عن كل نقطة أخرى في نفس الوقت.

يساعِد تشبيه البالونة كذلك — لكن هذه المرة نعني الجزء الداخلي منها — في فهم كيفية انخفاض درجة حرارة الكون بعد أن كان عبارة عن كرة نار كثيفة ملتهبة. لنتخيَّل معًا بالونة ساخنة للغاية تقوم بنفخها ليصبح حجمها كبيرًا جدًّا، بالرغم من أنه قد يصعب عليك مسكها في البداية بسبب سخونتها، فسيصير الهواء داخلها بعد التمدد أكثر برودةً بحيث يسهل على الإنسان الاقتراب منها. وتتنبَّأ نظرية الانفجار العظيم بأن الكون الساخن الكثيف قد تمدَّدَ، وانخفضت درجة حرارته أثناء ذلك التمدد.

استنتج أينشتاين، في الواقع، فكرةَ الكون المتمدد من معادلات النسبية العامة التي وضعها. لكن آنذاك، ما كان أحد قد قاسَ تمدُّد الكون بعدُ؛ لذلك لم يثق أينشتاين في تنبُّئِه، وطرح موردًا جديدًا للطاقة في محاولة منه لجعل نظريته تتفق مع فكرة الكون الثابت. وبعد القياسات التي أجراها هابل، صرف أينشتاين نظره عن هذا التحايل، واصفًا إياه بالخطأ «الأكثر فداحةً»، وإن لم يكن التعديل بهذا القدر من الخطأ على أي حال. وسوف نرى لاحقًا أن القياسات الحديثة تشير إلى أن مصطلح الثابت الكوني الذي أضافه أينشتاين هو مصطلح ضروري بالفعل في عمليات الرصد الحديثة، رغم أن الحجم المقيس المسئول عن سرعة تمدُّد الكون الذي ثبت مؤخرًا يزيد بمقدار قيمة أُسِّيَّة واحدة عن الحجم الذي اقترحه أينشتاين ليكون الكون ثابتًا.

وقد كان تمدُّد الكون نموذجًا جيدًا لتوافُق الأسلوبين التصاعدي والتنازلي في الفيزياء. فنظرية الجاذبية لأينشتاين تقضي بتمدُّد الكون، لكن الفيزيائيين لم يثقوا أنهم على الطريق السليم إلا عند اكتشاف التمدد.

واليوم، نشير إلى العدد الذي يحدِّد معدل تمدد الكون حاليًّا بثابت هابل، وهو ثابت بمعنى أن التمدد الجزئي في جميع أنحاء الفضاء متماثِل، لكن معامل هابل ليس ثابتًا دائمًا؛ ففي وقت سابق، عندما كان الكون أكثر سخونةً وكثافةً، وآثار الجاذبية أقوى، تمدَّدَ الكون بمعدل أسرع بكثير.

وقياس ثابت هابل بدقة أمر صعب، لأننا نواجِه المشكلة ذاتها التي طرحناها من قبلُ؛ وهي فصل الماضي عن الحاضر. فنحن بحاجة إلى معرفة مدى ابتعاد المجرات التي تتحرك بالإزاحة الحمراء؛ لأن هذه الإزاحة تعتمد على كلٍّ من معامل هابل والمسافة، وهذا القياس غير الدقيق هو مصدر عدم اليقين، الذي ذكرته في مستهل هذا الفصل، في زيادة عمر الكون بمقدار مرتين. وإذا كانت قياسات هابل غير مؤكدة بهذا المقدار، فسينطبق ذلك أيضًا على عمر الكون.

تم التوصُّل الآنَ إلى حلٍّ لهذا الخلاف؛ فقد قيس معامل هابل بواسطة ويندي فريدمان الباحثة في «مراصد سميثسونيان الفلكية» ومعاونيها وآخَرين، وتوصَّلوا إلى أن معدل التمدُّد يبلغ حوالي ٢٢ كيلومترًا في الثانية لأي مجرة تبعد بمقدار مليون سنة ضوئية. واستنادًا إلى هذه القيمة، نعرف الآن أن الكون يبلغ عمره حوالي ١٣,٧٥ مليار عام، وقد يزيد أو ينقص هذا التقدير بمائتي مليون عام، لكن ليس بمقدار النصف أو الضعف. ورغم أن هذا التقدير قد يبدو غير مؤكد، فإن مقدار عدم اليقين صغير للغاية بحيث لا يمكن أن يشكِّل أي اختلاف في فهمنا الحالي.

ثمة ملاحظتان رئيسيتان أخريان اتفقَتَا تمامًا مع التنبؤات وأكَّدَتَا على صحة نظرية الانفجار العظيم. فكان من القياسات — التي اعتمدت على تنبؤات فيزياء الجسيمات والنسبية العامة وأثبتت من ثَمَّ صحة كلتيهما — كثافة العناصر المختلفة في الكون، مثل الهليوم والليثيوم. ويتفق مقدار هذه العناصر الذي تتنبَّأ به نظرية الانفجار العظيم مع القياسات. يُعَدُّ ذلك من بعض النواحي إثباتًا غيرَ مباشِر للنظرية، لكن يجب إجراء حسابات مفصلة قائمة على الفيزياء النووية وعلم الكونيات لحساب هذه القيم. ورغم ذلك، فإن هذا التوافُق بين العديد من العناصر المختلفة والتنبؤات ما كان ليحدث إلا إذا كان الفيزيائيون والفلكيون على الطريق السليم.

من ناحية أخرى، عندما اكتشف الأمريكي روبرت ويلسون والألماني المولد آرنو بينزياس إشعاع الخلفية الميكروني البالغة درجة حرارته ٢,٧ درجة في عام ١٩٦٤، كان ذلك إثباتًا آخَر على صحة نظرية الانفجار العظيم. ولتصوُّرِ هذه الحرارة، يجدر التذكُّر أنه ما من شيء أكثر برودةً من الصفر المطلق، وهو الصفر على مقياس كلفن. وتزيد حرارة إشعاع الكون عن هذا الصفر، الذي يمثِّل الحدَّ الأقصى للبرودة التي يمكن أن يصل إليها أي شيء، بمقدار يقل عن ثلاث درجات.

كان تعاوُن روبرت ويلسون وآرنو بينزياس ومغامرتهما (التي حصَلَا بفضلها على جائزة نوبل عام ١٩٧٨) نموذجًا رائعًا لتضافُر جهود التكنولوجيا والعلم في بعض الأحيان بهدف تحقيق نتائج تفوق ما يمكن لأحد تخيُّله. عندما كانت شركة «إيه تي آند تي» تحتكر مجال الاتصالات في الولايات المتحدة، فعلت شيئًا رائعًا، وهو إنشاء «مختبرات بِل»، تلك البيئة البحثية المذهلة التي أُجرِيت بداخلها الأبحاث الخالصة والتطبيقية جنبًا إلى جنب.

عمل كلٌّ من روبرت ويلسون، الخبير المهووس بالتكنولوجيا والمعنِيِّ بالتفاصيل، وآرنو بينزياس، العالِم ذي الرؤية الشاملة، في مختبرات بِل حيث استخدَمَا وطوَّرَا معًا التليسكوبات اللاسلكية. وقد كان كلاهما مهتمًّا بالعلم والتكنولوجيا، بينما اهتمت شركة «إيه تي آند تي» بالاتصالات، وهو ما يمكن تفهُّمه؛ ومن ثَمَّ كانت الموجات اللاسلكية في السماء أمرًا مهمًّا لكافة الأطراف.

وفي مسعى ويلسون وبينزياس وراء هدف فلكي لاسلكي محدَّد، توصَّلَا إلى ما اعتبراه في البداية ضوضاء غامضة لا تفسير لها. بدت كضوضاء خلفية مُتَّسِقة، وثابتة على نحو أساسي. لم تكن الشمس هي مصدرها، ولم يكن لها علاقة أيضًا بأي اختبار نووي أجري في العام السابق. درس العالمان كافة التفسيرات التي يمكنهما التفكير فيها — ومن أشهرها فضلات الحمام — على مدار الشهور التسعة التي عملا خلالها على تفسير ما كان يحدث، وبعد التفكير في جميع الاحتمالات التي يمكن تخيُّلها، وتنظيف فضلات الحمام (أو «المواد البيضاء العازلة للكهرباء» كما كان يطلق عليها بينزياس)، بل واصطياد ذلك الحمام أيضًا، لم تتوقَّف الضوضاء.

وصف لي ويلسون كم كانَا محظوظين عندما توصَّلَا إلى اكتشافهما. لم يكن ويلسون وبينزياس على علم بنظرية الانفجار العظيم، لكن روبرت ديك وجيمس بيبلز — العالمين في جامعة برنستون — كانا على علم بها. أدرك هذان العالمان أن بقايا إشعاع الخلفية الكوني سيكون دليلًا على صحة هذه النظرية، وكانَا يعملان آنذاك على تصميم تجربة لقياس هذا الإشعاع عندما اكتشفَا أن هناك مَن سبقهما إلى هذا الاكتشاف، وهما العالمان بمختبرات بِل اللذان لم يكونا يدركان بعدُ ما توصَّلَا إليه. ولحسن حظ بينزياس وويلسون، عرف عالم الفضاء بمعهد ماساتشوستس للتكنولوجيا بيرني بيرك — الذي وصفه لي روبرت ويلسون بأنه الصورة المبكرة للإنترنت — بشأن البحث الذي كان يُجرَى في جامعة برنستون وباكتشاف بينزياس وويلسون أيضًا؛ فاستنبط النتيجة البديهية، وحقَّق التواصُلَ بين العلماء الأربعة ليخرج الاكتشاف بذلك إلى النور.

كان ذلك نموذجًا جيدًا للممارسة العملية للعلم، فالبحث كان قد أُجرِي لهدف علمي محدَّد، لكن صارت له فوائد علمية وتكنولوجية أخرى. لم يكن عالِمَا الفلك يبحثان عمَّا توصَّلَا إليه، لكنهما تمتَّعَا بمستوى عالٍ من المهارة التكنولوجية والعلمية، وعندما اكتشفا شيئًا ما، أدركَا ضرورة عدم تجاهُلِه، ونتج عن بحثهما — الذي استهدف ظواهرَ صغيرة نسبيًّا — اكتشاف ذو آثار عميقة للغاية، وهو الاكتشاف الذي توصَّلَا إليه لأنهما،

وغيرهما من العلماء الآخرين، كانَا يفكِّران في الصورة الأعم والأشمل في الوقت نفسه. لقد حدث اكتشاف عالِمَيْ مختبرات بِل مصادفةً، لكنه أحدث تغييرًا أبديًّا في علم الكونيات.

وقد أثبت الإشعاع الكوني أنه أداة مذهلة، ليس فقط فيما يتعلَّق بإثبات نظرية الانفجار العظيم، وإنما أيضًا في تحويل علم الكونيات إلى علم مُفصَّل. فإشعاع الخلفية الكوني يمنحنا وسيلةً لدراسة الماضي مختلفةً كليةً عن قياسات علم الفلك التقليدية.

في الماضي، عمد علماء الفلك إلى رصد الأجسام في السماء، ومحاولة تحديد عمرها، واستنباط التاريخ التطوري الذي أدَّى إلى ظهورها، لكن مع إشعاع الخلفية الكوني، تمكَّنَ العلماء أيضًا من دراسة الماضي قبل أن تتكوَّن البِنى فيه، مثل النجوم والمجرات. والضوء الذي يرصده هؤلاء العلماء انبعَثَ منذ زمن طويل، في مرحلة مبكرة للغاية من تطوُّر الكون. وفي الوقت الذي انبعث فيه إشعاع الخلفية الكوني الذي نرصده الآن، لم يكن حجم الكون يزيد عن واحد من الألف من حجمه الحالي.

ومع أن الكون كان زاخرًا في البداية بكافة أنواع الجسيمات — سواء المشحونة أو غير المشحونة — عندما انخفضت درجة حرارته بالقدر الكافي بعد مرور ٤٠٠ ألف عام على وجوده؛ اجتمعت الجسيمات المشحونة معًا لتكون ذرات متعادلة الشحنات. وما إن حدث ذلك حتى توقَّف تشتُّت الضوء؛ ومن ثَمَّ فإن إشعاع الخلفية الكوني المرصود يصل مباشَرةً إلى التليسكوبات الموجودة على سطح الأرض أو في الأقمار الصناعية بعد نحو ٤٠٠ ألف عام من وجود الكون، دون أن يعيقه أو يوقفه شيء. وإشعاع الخلفية الذي اكتشفه بينزياس وويلسون هو الإشعاع نفسه الذي كان موجودًا في مراحل مبكرة من تاريخ الكون، لكنه خفَّ وبرد أثناء تمدُّد الكون، وقد انتقل هذا الإشعاع مباشَرةً إلى التليسكوبات التي اكتشفته دون أي معيقات ناتجة عن التشتُّت بفعل أي جسيمات مشحونة. وهذا الضوء يمنحنا نظرةً مباشِرةً ودقيقةً على الماضي.

قاس مستكشف إشعاع الخلفية الميكروني الكوني — وهي مهمة بالقمر الصناعي بدأت في عام ١٩٨٩ واستمرت أربعة أعوام — هذا الإشعاع بدقة متناهية، وتوصَّلَ علماء المهمة إلى أن ما أَجْرَوه من قياسات يتفق مع التنبؤات بدقة لا يزيد فيها هامش الخطأ عن واحد في الألف، لكن المستكشف قاسَ شيئًا جديدًا أيضًا، وهو قدر ضئيل من عدم الاتساق في درجة الحرارة بأنحاء السماء؛ وهو الاكتشاف الأهم لهذا المستكشف إلى الآن. فرغم الاتساق الكبير في توزيع البنية الكونية، تظهر مواطن دقيقة من عدم التجانس في مستوًى يقل عن واحد في العشرة آلاف في المراحل المبكرة من عمر الكون، وهذه المواطن

نمَتْ ولعبت دورًا مهمًّا في تطوُّر البنية الكونية. وقد بدأت هذه المواطن في نطاقات طول دقيقة، لكنها امتدَّتْ بعد ذلك إلى أحجام تتناسَب مع البنية والقياسات الفيزيائية الفلكية. وقد تسبَّبَتِ الجاذبية في زيادة تركيز المناطق الأعلى كثافةً — التي زادت فيها الاضطرابات بشكل كبير — بحيث كوَّنَتِ الأجرامَ الضخمة التي نراها حاليًّا. فجميع النجوم والمجرات والعناقيد المجرية التي تناولناها فيما سبق هي نتاج هذه الاضطرابات الكمية الأولية البسيطة وتطوُّرها بفعل الجاذبية.

يظل قياس إشعاع الخلفية الكوني مهمًّا في فهمنا لتطور الكون، ولا يمكن التقليل من شأن الدور الذي يلعبه هذا القياس باعتباره نافِذةً مباشِرةً نطل من خلالها على الكون في مراحله المبكرة. ومؤخرًا، قدَّمَتْ قياساتُ إشعاع الخلفية الكوني — بالإضافة إلى الأساليب الأكثر تقليدية — معلوماتٍ تجريبيةً دقيقةً حول العديد من الظواهر الأكثر غموضًا، كالتضخم الكوني، والمادة المظلمة، والطاقة المظلمة، والتي سنتناولها فيما يلي.

الفصل العشرون

الضخم في نظرك ضئيل في نظري

أثناء عملي أستاذةً في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، نفدت المكاتب المتاحة في القسم الموجود في الطابق الثالث من المعهد الذي كان يشغله آنذاك فيزيائيو الجسيمات، فانتقلتُ إلى المكتب المفتوح المجاور لمكتب آلان جوث في الطابق الثاني الذي ضمَّ آنذاك الفيزيائيين النظريين في مجالَيْ علم الكونيات والفلك. رغم أن آلان بدأ مسيرته المهنية كعالم في مجال فيزياء الجسيمات، فإنه يشتهر الآن بكونه أحد أفضل علماء الكونيات، وفي الوقت الذي نُقِل فيه مكتبي إلى جواره، كنت قد اكتشفت بالفعل بعض الروابط بين فيزياء الجسيمات وعلم الكونيات، لكن لا شك أنه من الأيسر بكثير اكتشاف المزيد في هذا الشأن عندما يشارِكك مَن يجاورك في مكان العمل الاهتمامات نفسها، فضلًا عن أن يكون بالقدر نفسه من الفوضوية التي تتسم بها؛ ما يجعلك تشعر بالارتياح في المكان كما لو كنتَ في منزلك.

لم يقتصر ابتعاد العديد من فيزيائيي الجسيمات عن مجالهم الأصلي على الانتقال من مكتب لآخَر فحسب، وإنما هجر الكثيرون منهم فيزياء الجسيمات قاصدين مجالات بحثية أخرى عديدة. فنجد مثلًا أن والي جيلبرت — أحد مؤسِّسي شركة بيوجن — بدأ حياته كفيزيائي جسيمات، لكنه ترك المجال ليدرس علم الأحياء ويحصل على جائزة نوبل بفضل أحد أبحاثه في مجال الكيمياء، ومنذ ذلك الحين، سار على خطاه كثيرون. من ناحية أخرى، ترك الكثير من أصدقائي في مرحلة الدراسات العليا فيزياء الجسيمات ليعملوا «محلِّلين كمِّيِّينَ للأوراق المالية» ببورصة وول ستريت، حيث يراهنون على التغييرات التي ستطرأ على الأسواق في المستقبل. وقد أصاب هؤلاء في اختيار الوقت المناسب لاتخاذ هذه الخطوة؛ لأن الأدوات المالية التي تحكم هذه المراهنات كانت في

طور التطوير آنذاك. وعند الانتقال إلى علم الأحياء، نقل فيزيائيو الجسيمات معهم طرق التفكير وتنظيم المشكلات، بينما نقلوا إلى عالم الأموال المناهج والمعادلات.

لكن لا ريب أن التداخل بين فيزياء الجسيمات وعلم الكونيات أكثر عمقًا وثراءً بكثير من أيٍّ من صور التداخل الموضحة فيما سبق؛ إذ كشف الفحص الدقيق للكون على مختلف المستويات عن الكثير من الروابط بين الجسيمات الأولية في أصغر النطاقات والكون نفسه في أكبر النطاقات. ففي النهاية، الكون — بطبيعته — فريد ويضم كل شيء بداخله. وفيزيائيو الجسيمات الذين يتجهون في بحثهم نحو الداخل، يبحثون عن ماهية المادة الأساسية التي توجد في جوهر المادة، وعلماء الكونيات الذين يتجهون في بحثهم نحو الخارج، يدرسون كيفية تطوُّر ما يوجد في الخارج، أيًّا كانت ماهيته. ويهتم علماء الكونيات وفيزيائيو الجسيمات على حدٍّ سواء بالألغاز التي ينطوي عليها الكون، وأهمها العناصر التي يتألَّف منها.

كلتا الفئتين من الباحثين تَعمِدان إلى دراسة البنية الأساسية وتوظِّفان القوانين الفيزيائية الرئيسية، وينبغي لكل فئة منهما الأخذ في الاعتبار النتائج التي تتوصَّل إليها الفئة الأخرى. فمحتوى الكون الذي يدرسه فيزيائيو الجسيمات موضوع بحثي مهم لعلماء الكونيات أيضًا، هذا فضلًا عن أن قوانين الطبيعة التي تشمل النسبية العامة وفيزياء الجسيمات توضِّح تطوُّر الكون، الأمر الذي من المفترض أن تفعله هذه القوانين إذا كانت هاتان النظريتان صحيحتين وتنطبقان على نظام كوني واحد. في الوقت نفسه، يفرض تطور الكون قيودًا على الخصائص التي يمكن أن تتصف بها المادة كي لا يحدث تعارُض مع التاريخ المرصود للكون. وقد كان الكون — من بعض النواحي — أول معجِّل للجسيمات وأعتاها؛ فقد كانت الطاقات ودرجات الحرارة عالية للغاية في المراحل المبكرة من تطوُّر الكون، وتهدف الطاقات العالية التي تحقِّقها المعجِّلات حاليًّا إلى إعادة تمثيل بعض هذه الظروف الآن على سطح الأرض.

والانتباه مؤخرًا لهذا التقارب في الاهتمامات بين علم الكونيات وفيزياء الجسيمات أدَّى إلى ظهور الكثير من الأبحاث المثمرة والوصول إلى مدارك مهمة، الأمر الذي نطمح في استمراره. ويستعرض هذا الفصل بعض الأسئلة المهمة التي لم تُحَل بعدُ في علم الكونيات، والتي يدرسها كلٌّ من علماء الكونيات وفيزيائيي الجسيمات. وتشمل الجوانب المتداخلة بين العلمين كلًّا من التضخم الكوني، والمادة المظلمة، والطاقة المظلمة. ولن

نقتصر في تناولنا على الجوانب التي نفهمها في كلٍّ من هذه الظواهر، بل سنتناول أيضًا الجوانب التي لا نفهمها؛ لأنها هي الأهم في الأبحاث الحالية.

التضخم الكوني

بالرغم من أنه لا يمكننا الجزم بعدُ بما حدث في اللحظات الأولى من عمر الكون — نظرًا لأننا سنحتاج في هذه الحالة إلى نظرية شاملة تتضمن كلًّا من ميكانيكا الكم والجاذبية — يمكننا التأكيد بقدر معقول من اليقين على أنه في لحظة ما في تلك المرحلة المبكرة من عمر الكون (ربما بعد انقضاء نحو $١٠^{-٣٩}$ ثانية من تطوره)، وقعت ظاهرة تُسمَّى «التضخم الكوني».

كان آلان جوث هو أول مَن طرح هذا الاقتراح في عام ١٩٨٠. يشير هذا الاقتراح إلى أن الكون في أولى مراحل عمره انفجَرَ نحو الخارج، والمثير للاهتمام هنا أن آلان كان يحاوِل في البداية حل إحدى مسائل فيزياء الجسيمات التي تتضمن التبعات الكونية لنظريات التوحيد العظمى. ونظرًا لخلفيته العلمية الفيزيائية، اتبع آلان الأساليب المتبعة في نظرية الحقول؛ وهي النظرية التي تجمع ما بين النسبية الخاصة وميكانيكا الكم اللتين يوظفهما فيزيائيو الجسيمات في حساباتهم. لكن انتهى به الحال إلى استقاء نظرية أحدثت ثورة في أفكار علم الكونيات. لكن تظل كيفية حدوث التضخم وتوقيته أمرًا يخضع للتكهنات. بيد أن الكون الذي يمر بمثل هذا التمدد الانفجاري لا بد أن يخلِّف آثارًا واضحة على ذلك، وقد عُثِر على أغلبها بالفعل.

يشير السيناريو القياسي للانفجار العظيم إلى أن الكون في مرحلة مبكرة من عمره نما على نحو هادئ وثابت، على سبيل المثال، عن طريق مضاعفة حجمه مع زيادة عمره بمقدار أربع مرات. لكن في فترة التضخم، تعرَّضَتْ رقعة من السماء لمرحلة من التمدد السريع للغاية بحيث تضاعَفَ حجمها تضاعُفًا أسيًّا؛ فتضاعَفَ حجم الكون في فترة زمنية ثابتة، ثم تضاعَفَ مجدَّدًا في فترة زمنية مماثلة، وظل يتضاعَف ٩٠ مرة متتالية على الأقل حتى انتهت فترة التضخم، وصار الكون بالصقل الذي نراه عليه الآن. هذا التمدد الأسي يعني، على سبيل المثال، أنه عندما يزيد عمر الكون بمعدل ٦٠ مرة، فإن حجمه سيزيد بما يفوق تريليون تريليون تريليون مرة، ولولا التضخم، لكان حجم الكون سيزيد بمقدار ثماني مرات فقط. شكَّل التضخم — بصورة ما — بدء قصة تطوُّر حجم الكون، على الأقل الجزء الذي يمكننا إدراكه من خلال عمليات الرصد.

والتمدد التضخمي الأولي الهائل كان من شأنه إذابة المادة والمحتوى الإشعاعي بالكون إلى لاشيءٍ. وبناءً عليه، فإن كل ما نراه اليوم في الكون لا بد أن يكون قد نشأ بعد التضخم مباشَرةً عندما تحوَّلت الطاقة — التي ساعدت على حدوث الانفجار التضخمي — إلى مادة وإشعاع، بعد ذلك استمر نمط تطوُّر الانفجار العظيم التقليدي، وبدأ الكون في التطور إلى البنية الضخمة التي نراها الآن.

يمكننا النظر للانفجار التضخمي على أنه «الانفجار» الذي سبق تطوُّر الكون وفق ما تنص عليه نظرية «الانفجار العظيم» القياسية، وهو ليس في الحقيقة بداية الكون — فنحن لا نعلم ما حدث عندما لعبت الجاذبية الكمية دورًا — وإنما هو بداية مرحلة تطور الانفجار العظيم، مع انخفاض درجة حرارة المادة وتجمعها في النهاية.

تجيب نظرية التضخم كذلك بصورة ما على السؤال التالي: ما السبب وراء وجود مادة الكون؟ تحوَّلت بعض كثافة الطاقة الهائلة التي خُزِّنت أثناء التضخم (بما يتفق مع معادلة ط = ك‌س٢) إلى مادة، وهذه المادة هي التي تطوَّرَتْ إلى ما نراه الآن، لكن الفيزيائيين — مثلما سأشير في ختام هذا الفصل — لا يزالون يرغبون في معرفة السبب وراء احتواء الكون قدرًا من المادة يفوق المادة المضادة. لكنْ أيًّا كانت الإجابة عن هذا السؤال، تبقى حقيقة أن المادة التي نعرفها بدأت تتطور وفق تنبؤاتِ نظرية الانفجار العظيم بمجرد أن انتهى التضخم الكوني.

وُضِعت نظرية التضخم باتباع الأسلوب التصاعدي، فقدمت هذه النظرية حلولًا لمشكلات مهمة تتعلَّق بنظرية الانفجار العظيم التقليدية، لكن لم يؤمن سوى عدد قليل فقط من العلماء بالنماذج الفعلية لكيفية حدوث هذا التضخم. فما من نظرية مقنعة للطاقة العالية تقضي بحدوث هذا التضخم. ونظرًا للصعوبة الهائلة التي اكتنفت تقديم نموذج معقول، تشكَّكَ الكثير من الفيزيائيين (بما في ذلك علماء جامعة هارفرد حيث كنتُ أعدُّ دراساتي العليا) في صحة الفكرة. على الجانب الآخَر، آمَن الفيزيائي أندري ليند — وهو فيزيائي روسي المولد يعمل الآن في جامعة ستانفورد ومن أول مَن عملوا على موضوع التضخم — بصحة الفكرة ببساطة؛ لأنه ما من أحد قد توصَّلَ إلى حل آخَر للألغاز المتعلقة بحجم الكون وشكله وتجانسه، وهي الألغاز التي تحلها نظرية التضخم.

لقد كان التضخم نموذجًا مثيرًا للاهتمام للعلاقة بين الحقيقة والجمال، أو بالأحرى عدم وجود هذه العلاقة، فرغم أن التمدد الأسي للكون يفسِّر على نحو جميل وجامعٍ

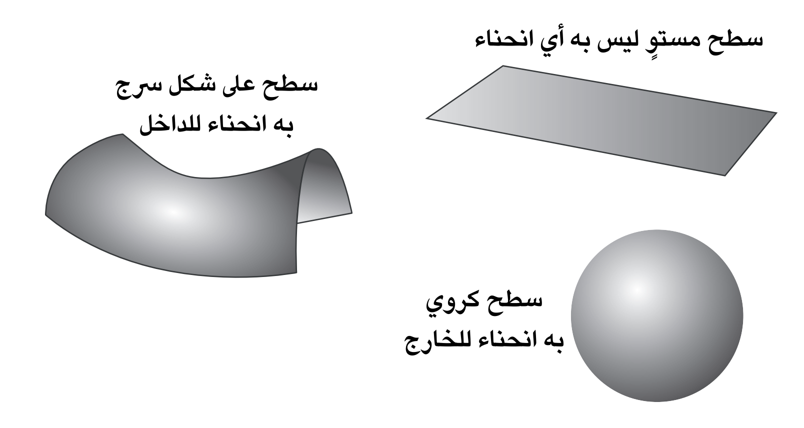
العديدَ من الظواهر المتعلِّقة بكيفية بدء الكون، فإن البحث عن نظرية تؤدِّي إلى حدوث هذا التمدد الأسي أَسْفَرَ عن العديد من النماذج التي تفتقر إلى الجمال.

ومع ذلك، صار أغلب الفيزيائيين حاليًّا — رغم عدم رضاهم بعدُ عن معظم النماذج — مقتنعين بأن التضخم، أو شيئًا شبيهًا به للغاية، قد حدث؛ فأثبتت الملاحظات التي أُجريت على مدار عدة أعوام ماضية صحة الصورة الكونية للانفجار العظيم الذي سبَقَ التضخُّمَ. ويثق الكثير من الفيزيائيين الآن في أن تطوُّرَ الانفجار العظيم والتضخُّم قد حدَثَا؛ لأن التنبؤات التي تستند إلى هاتين النظريتين قد ثبَتَتْ صحتها بدقة مذهلة. لا يزال النموذج الحقيقي للتضخُّم محل دراسة، لكن هناك العديد من الأدلة التي تدعم فكرة التمدد الأسي حاليًّا.

يتعلَّق أحد الأدلة، التي تثبت حدوث التضخم الكوني، بانحرافات إشعاع الخلفية الميكروني الكوني، الذي سبق أن عرضناه في الفصل السابق، عن الاتساق المثالي. يثبت لنا هذا الإشعاع ما هو أكثر بكثير من حدوث الانفجار العظيم، ويكمن جماله في أنه يعكس لمحةً عن الكون في مرحلة مبكرة للغاية من عمره — قبل أن تتكون النجوم — الأمر الذي يسمح لنا بإلقاء نظرة مباشِرة على بدايات بنية الكون عندما كان لا يزال متجانسًا للغاية. تكشف قياسات إشعاع الخلفية الميكروني الكوني أيضًا عن انحرافات بسيطة عن التجانس التام، ويتنبَّأ التضخم بذلك أيضًا لأن التقلبات الميكانيكية الكمية تسبَّبَتْ في انتهاء التضخم في أوقات متباينة بعض الشيء في مناطق مختلفة من الكون؛ ما أدَّى إلى ظهور انحرافات دقيقة عن الاتساق التام. وقد أجرى مسبار ويلكينسون لقياس اختلاف الموجات الميكرونية — يرجع اسمه إلى الفيزيائي ديفيد ويلكينسون الذي كان له الفضل في ريادة المشروع — قياسات مفصلة ميَّزَتِ التنبؤات المتعلقة بالتضخم عن الاحتمالات الأخرى. وعلى الرغم من حقيقة حدوث التضخم منذ فترة طويلة عند درجات حرارة عالية للغاية، تتنبَّأ النظرية القائمة على علم الفلك التضخمي بخصائص إحصائية دقيقة لنمط التنوعات في درجة الحرارة التي لا بد أن تكون ظاهرةً في السماء حاليًّا. وقد قاس المسبار الحالاتِ البسيطةَ من عدم التجانس في درجة الحرارة وكثافة الطاقة بدرجة أكبر من الدقة، وعلى نطاقات زوايا أصغر مقارنةً بأي قياسات سابقة، واتفق النموذج الذي توصَّلَ إليه مع التوقعات المتعلقة بالتضخم.

كان الدليل الرئيسي الذي توصَّلَ إليه المسبار على حدوث التضخم هو قياس تسطُّح الكون التام. أوضح لنا أينشتاين إمكانية أن يكون الفضاء منحنيًا. (انظر الشكل ٢٠-١

للاطلاع على نماذج للأسطح المنحنية الثنائية الأبعاد.) ويعتمد الانحناءُ على كثافة طاقة الكون. وعند طرح فكرة التضخم للمرة الأولى، كان معلومًا أن تسطُّحَ الكون يفوق ما قد تشير إليه التوقعات البسيطة، لكن القياسات كانت أبعد ما يكون عن الدقة التي تسمح لها باختبار صحة التنبؤات المتعلقة بالتضخم، والتي تشير إلى أن الكون سيتمدَّد بدرجة تجعل أي انحناء يستوي. وقد أوضحَتْ قياسات إشعاع الخلفية الميكروني الكوني الآن أن الكونَ مستوٍ حتى مستوًى قدرُه واحدٌ في المائة، الأمر الذي يصعب إدراكه للغاية بدون وجود تفسير مادي يقوم عليه.



شكل ٢٠-١: يوضِّح هذا الشكل أسطحًا ثنائية الأبعاد أحدها لا يحتوي على أي انحناءات، في حين يحتوي آخَر على انحناء للداخل، والثالث على انحناء للخارج. يمكن للكون أيضًا أن ينحني، لكن يصعب توضيح ذلك بالرسم في الزمكان الرباعي الأبعاد.

كانت فكرة تسطُّح الكون بمنزلة انتصار عظيم لعلم الفلك المؤيد لفكرة التضخم؛ فلو ثبت خطأ فكرة تسطُّح الكون، لاستُبعِدت فكرة التضخم تمامًا. كانت قياسات مسبار ويلكينسون لقياس اختلاف الموجات الميكروني، أيضًا، انتصارًا للعلم. وعندما اقترح الفيزيائيون النظريون في البداية القياسات المفصلة لإشعاع الخلفية الميكروني الكوني التي ستوضِّح لنا في النهاية هندسة الكون، اعتقد الجميع أنها ستكون موضوعًا مثيرًا للمجتمع العلمي، لكن من الصعب للغاية فنيًّا تنفيذها في أي وقت قريب. مع

ذلك، في خلال عشر سنوات — وعلى عكس كل التوقعات — أجرى علماء الفلك الرصدي القياسات الضرورية وتوصَّلوا إلى رؤًى مذهلة بشأن كيفية تطوُّر الكون. ولا يزال مسبار ويلكينسون لقياس اختلاف الموجات الميكروني يقدِّم نتائج جديدة عن طريق إجراء قياسات مفصلة للتنوُّع في درجة الحرارة بأرجاء السماء. كما لا يزال القمر الصناعي بلانك، الذي يعمل الآن، يقيس التقلُّبات على نحو دقيق. وقد أثبتَتْ قياسات إشعاع الخلفية الكوني الميكروني أنها مصدر رئيسي للتوصُّل إلى معلومات دقيقة حول الكون في مرحلة مبكرة من عمره، وسوف تستمر في ذلك على الأرجح.

أدَّتْ أيضًا الدراسات التفصيلية التي أُجرِيت مؤخرًا حول الأشعة الكونية المتخلِّفة في أرجاء السماء إلى طفرات هائلة في المعرفة الكمية للكون وتطوره. قدمت كذلك التفاصيلُ المتعلقةُ بهذه الأشعة قدرًا كبيرًا من المعلومات حول المادة والطاقة التي تحيط بنا، وبالإضافة إلى توضيح الظروف التي بدأ فيها الضوء التوجُّه نحونا، يكشف لنا إشعاع الخلفية الميكروني الكوني عن معلومات حول الكون الذي وجب على الضوء الانتقال عبره. فإذا كان الكون قد شهد تغيُّرًا في الـ ١٣٫٧٥ مليار سنة الأخيرة، أو كانت طاقته قد تغيَّرَتْ عمَّا هو متوقَّع، فإن النسبية توضِّح لنا أنه كان من المفترض أن يؤثِّر على المسار الذي اتبعه شعاع الضوء؛ ومن ثَمَّ على الخصائص المقيسة للإشعاع الذي تمَّ قياسه. ونظرًا لأن إشعاع الخلفية الميكروني الكوني مسبار حسَّاس لمحتوى الطاقة في الكون حاليًّا، فإنه يقدِّم لنا معلومات حول ما يحتويه الكون. ويشمل ذلك المادة المظلمة والطاقة المظلمة اللتين سننتقل إليهما الآن.

قلب الظلام

إلى جانب نجاح قياسات إشعاع الخلفية الميكروني الكوني في إثبات صحة نظرية التضخم، طرحت هذه القياسات بعض الألغاز المهمة التي يرغب علماء الكونيات والفلك وفيزياء الجسيمات في حلها حاليًّا. يوضِّح لنا التضخم أن الكون يجب أن يكون مسطَّحًا، لكنه لا يخبرنا أين تكمن الآن الطاقة التي تطلَّبَها هذا التسطيح لكي يحدث. مع ذلك، وبناءً على معادلات أينشتاين للنسبية العامة، يمكننا حساب الطاقة اللازمة ليكون الكون مسطحًا اليوم. وقد اتضح أن المادة المرئية المعروفة تشكِّل وحدها أربعة في المائة فحسب من هذه الطاقة.

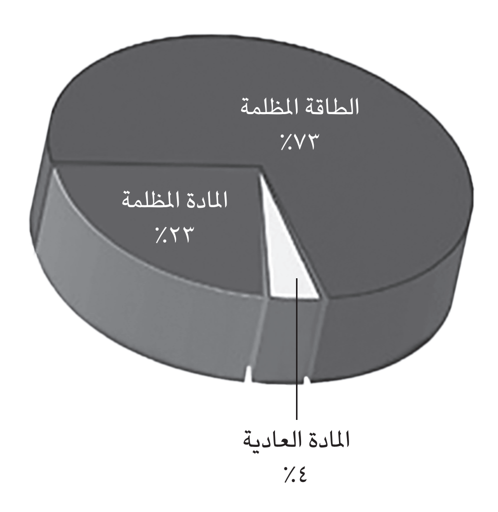
ثمة لغز آخَر يشير إلى ضرورة وجود شيء ما لم نعرفه من قبلُ، وهو لغز يتعلَّق بضآلة حجم الاضطرابات في الحرارة والكثافة التي قاسها مستكشف إشعاع الخلفية الميكروني الكوني. ففي ظل وجود المادة المرئية وهذه الاضطرابات الضئيلة فقط، ما كان الكون ليظل موجودًا فترة كافية من الوقت تسمح لهذه الاضطرابات بأن تزيد إلى المستوى الذي يسمح بدوره بتكوين البنى الكونية. ومن ثَمَّ، فإن وجود المجرات والعناقيد المجرية في ظلِّ ضآلة الاضطرابات المقيسة يشير إلى مادة لم يسبق لأحد رؤيتها مباشَرةً من قبلُ.

وفي الواقع، كان العلماء على علم بالفعل بضرورة وجود نوع جديد من المادة يُعرَف باسم المادة المظلمة قبل نتائج الإشعاع الميكروني الكوني التي توصَّلَ إليها مستكشف إشعاع الخلفية الميكروني الكوني بفترة طويلة. فقد أشارت ملاحظات أخرى، سنتناولها بعد قليل، إلى ضرورة وجود مادة أخرى غير مرئية، وهذه المادة الغامضة — التي صارت تُعرَف باسم المادة المظلمة — لها تأثير جذبوي، لكنها لا تتفاعل مع الضوء. ونظرًا لأنها لا تمتص الضوء أو ينبعث منها، فهي غير مرئية، أو مظلمة. والمادة المظلمة (سنواصل استخدام هذا المصطلح) لم تعكس سوى عدد قليل فقط من الخصائص المميزة لها، بخلاف تأثيرها الجذبوي وتفاعلها الضعيف للغاية.

أيضًا، يشير التأثير الجذبوي وقياساته إلى وجود شيء ما أكثر غموضًا من المادة المظلمة؛ أَلَا وهو الطاقة المظلمة. تتغلغل هذه الطاقة في كافة أرجاء الكون، لكنها لا تتكتل مثل المادة العادية أو تترقق مع تمددها، وهي أشبه بالطاقة التي سرَّعت من حدوث التضخم، لكن كثافتها اليوم أقل بكثير من الوقت الذي حدث فيه هذا التضخم.

لذا، بالرغم من أننا نعيش الآن عصرًا من النهضة في علم الفلك تطوَّرَتْ فيه النظريات وعمليات الرصد إلى مرحلة يمكن معها اختبارُ صحةِ الأفكار بدقة، فإننا نعيش في الوقت نفسه عصرًا من «الظلام». فنحو ٢٣ في المائة من طاقة الكون تحملها المادة المظلمة، وحوالي ٧٣٪ تحملها الطاقة المظلمة الغامضة، كما هو موضَّح في المخطط الدائري المرفق. (انظر الشكل ٢٠-٢)

آخر مرة أُطلِقَ فيها وصف «مظلم» على أي شيء كانت في العقد الأول من القرن التاسع عشر، عندما اقترح العالم الفرنسي، أوربان جان جوزيف لوفيري، وجود كوكب مظلم غير مرئي، وأطلق عليه اسم «فولكان». كان هدف لوفيري من هذا الاقتراح هو تفسير المسار المميز لكوكب عطارد. وكان لوفيري، برفقة الإنجليزي جون كوش آدامز،



شكل ٢٠-٢: مخطط دائري يوضِّح الكميات النسبية للمادة المرئية، والمادة المظلمة، والطاقة المظلمة التي يتألَّف منها الكون.

قد استنتجا في السابق وجود كوكب نبتون بناءً على آثاره التي تظهر على كوكب أورانوس. لكنه أخطأ فيما يتعلَّق بكوكب عطارد؛ إذ ثبت بعد ذلك أن السبب وراء المسار الغريب لهذا الكوكب أكثر أهمية بكثير من مجرد وجود كوكب آخَر، ولا يمكن الوصول لهذا التفسير إلا باستخدام نظرية النسبية لأينشتاين. فكان أول دليل يثبت صحة نظرية النسبية العامة لأينشتاين هو أنه تمكَّنَ من استخدامها للتنبُّؤ بمدار كوكب عطارد تنبُّؤًا دقيقًا.

ربما يثبت فيما بعد أيضًا أن المادة المظلمة والطاقة المظلمة نتائج لنظريات معلومة. لكن ثمة احتمالًا آخَر في أن يتسبَّب هذان العنصران المفقودان في تغيُّر جذري مماثل في النموذج الفكري للعلماء. والزمن وحده هو الذي سيثبت أيٌّ من هذين الخيارين سيحل مسألتَيِ المادة المظلمة والطاقة المظلمة.

مع ذلك، فإنني أومن بأن المادة المظلمة لها على الأرجح تفسير أكثر كلاسيكيةً، وهو التفسير المُتَّسِق مع القوانين الفيزيائية التي نعرفها الآن. فحتى إذا كانت المادة الجديدة

تتبع قوانينَ قوًى مشابهةً للقوانين التي نعرفها، فما الذي يحتم اتباع كلِّ المواد نفسَ نهجِ المادة التي نعرفها؟ بعبارة أدق، لماذا يجب أن تتفاعل جميع المواد مع الضوء؟ إذا كنَّا قد تعلَّمْنا شيئًا من تاريخ العلم، فهو أن الإيمان بما نراه فقط يُعَدُّ نوعًا من قِصَر النظر.

لكن ذلك لا يعبِّر عن وجهة نظر كثيرين، فهم يجدون غموضًا هائلًا في وجود المادة المظلمة، ويتساءلون: كيف يمكن لمعظم المادة — نحو ستة أضعاف كمية المادة المرئية — أن تكون شيئًا لا يمكننا اكتشافه باستخدام التليسكوبات التقليدية؟ وثمة آخَرون تراوِدهم شكوكٌ بعدم صحة فكرة المادة المظلمة برمتها. لكنني، شخصيًّا، أومن بعكس ذلك تمامًا (وإنْ كنتُ أعترف بأن ذلك ليس حال جميع الفيزيائيين)؛ لعل اقتصار المادة على ما نراه فقط بأعيننا فكرة أكثر غموضًا في نظري. فما الذي يحتم امتلاكنا حواسَّ مثالية يمكنها إدراك كل شيء على نحو مباشر؟ مرة أخرى، الدرس الذي علَّمته لنا الفيزياء على مدار قرون عديدة هو أن هناك قدرًا هائلًا من الأمور التي يغفل عنها بصرنا. ومن هذا المنظور، يصير الغامض في الأمر هو: لماذا تمثِّل المادة التي نعرفها ١ / ٦ تحديدًا من طاقة المادة ككل؟ وهي مصادفة واضحة نحاوِل أنا وزملائي حاليًّا فهمها.

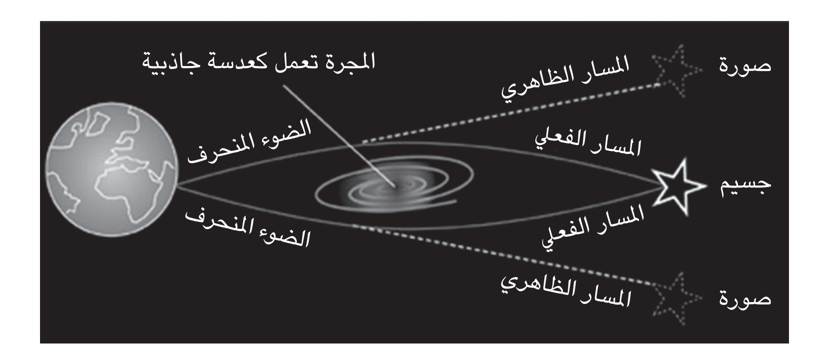
نحن نعلم أنه لا بد من وجود شيء ما يتعلق بمواصفات المادة المظلمة، وبالرغم من أننا لا «نرى» هذه المادة فعليًّا، يمكننا اكتشاف أثرها الجذبوي. والسبب وراء علمنا بحتمية وجود هذه المادة هو العدد الكبير من الأدلة القائمة على الرصد التي تشير إلى آثارِ هذه المادة الجاذبة في النظام الكوني. وقد توصَّلْنا إلى الدليل الأول على وجودها من السرعة التي تدور بها النجوم داخل العناقيد المجرية؛ إذ لاحَظَ فريتز زفيكي في عام ١٩٣٣ أن المجرات الموجودة في عناقيد تدور أسرع مما يمكن أن تسمح به الكتلة المرئية لها، ولاحَظَ جون أورت بعد ذلك بفترة وجيزة ظاهرةً مشابهة في مجرة درب التبانة. وصل اقتناع زفيكي باكتشافه إلى حد اقتراح وجود مادة مظلمة لا يمكن لأحد رؤيتها مباشَرةً، لكن لم يكن أي من هاتين الملاحظتين حاسمًا؛ فبدا القياس الخاطئ أو أي صورة أخرى من ديناميكيات المجرات تفسيرًا أكثر إقناعًا لما رصده زفيكي من وجود مادة غير مرئية اصطُنِع وجودها خصوصًا ليعزى إليه التجاذب التثاقلي الإضافي.

في الوقت الذي أجرى فيه زفيكي قياساته، لم تتوفَّر لديه الدقة اللازمة لرؤية النجوم الفردية، لكن فيرا روبين، عالمة الفلك الرصدي، قدَّمَتْ لنا أدلةً أكثر قوةً على وجود المادة المظلمة، فأجرت هذه العالمة بعد زفيكي بفترة طويلة — في أواخر الستينيات

وأوائل السبعينيات — قياسات كمية مفصلة للنجوم التي تدور في المجرات. وما بدا في البداية دراسة «مملة» للنجوم وهي تدور في إحدى المجرات — وهي الدراسة التي اهتمت بها فيرا بسبب عدم تناول الأنشطة الفلكية الأخرى لها كثيرًا — صار الدليل الأول القوي على وجود المادة المظلمة في الكون. وتوصَّلت عمليات الرصد التي أجرتها هذه العالمة، برفقة كينت فورد، إلى أدلة قاطعة على صحة الاستنتاج الذي توصَّلَ إليه زفيكي قبل ذلك الحين بسنوات.

ولعلك تتساءَل: كيف يمكن لشخص النظر في التليسكوب ورؤية شيء مظلم؟ والإجابة هي أن هذا الشخص يمكن أن يرى نتائج جاذبية هذا الشيء المظلم. فخصائص أي مجرة، مثل معدل دوران النجوم حولها، تتأثَّر بمقدار المادة التي تحتوي عليها، ومع وجود المادة المرئية فقط، يكون من المتوقَّع ألَّا تتأثَّر النجوم البعيدة عن المجرة بتأثير جاذبية هذه المجرة. لكن ما لوحِظ هو أن النجوم، التي تبعد عشرة أضعاف المسافة التي تبعدها المادة المركزية المضيئة، تدور بنفس سرعة النجوم القريبة من مركز المجرة. ويشير ذلك إلى أن كثافة الكتلة لم تقلَّ مع تزايد المسافة، على الأقل في المسافات التي تبعد عن مركز المجرة بمقدار عشرة أضعاف المسافة التي تبعدها المادة المضيئة. واستنتج علماء الفلك من ذلك أن المكون الأساسي للمجرات هو المادة المظلمة غير المرئية. والمادة المضيئة التي نراها تمثِّل جزءًا ليس بقليل من المجرة، لكن أغلب المجرة غير مرئي، على الأقل بالمعنى المعتاد للكلمة.

تتوفَّر لدينا الآن مجموعة كبيرة من الأدلة الأخرى التي تُثبِت وجود المادة المظلمة، وبعضٌ من أكثر هذه الأدلة وضوحًا مستقًى من تأثير عدسة الجاذبية الموضَّح في الشكل ٢٠-٣. وتأثير عدسة الجاذبية هو ظاهرة تحدث عندما يمر الضوء بجوار جسم ضخم، وحتى إن لم يكن هذا الجسم يبعث ضوءًا، فسيكون له تأثير جذبوي، وهذا التأثير الجذبوي يمكن أن يتسبَّب في انحناء الضوء المنبعث عن جسم غير مظلم خلفه (مثلما نراه من زاوية رؤيتنا). وبما أن الضوء ينحني في اتجاهات مختلفة حسب المسار الذي يسلكه حول الجسم المظلم، ولأننا نتصوَّر دائمًا أن يتَّخِذ الضوء صورةَ خطوط مستقيمة، يمكن لتأثير عدسة الجاذبية أن ينتج صورًا متعددة للجسم الساطع الأصلي في السماء، وهذه الصور المتعددة تتيح لنا «رؤية» الجسم المظلم، أو على الأقل الاستدلال على وجوده وخصائصه عن طريق استنتاج الجاذبية اللازمة لانحناء الضوء المرصود.



شكل ٢٠-٣: يمكن للضوء الذي يمر بجوار جسم ضخم أن ينحني؛ ما يجعله يبدو من منظور الراصد وكأنه صور متعددة للجسم الأصلي.

ولعل «عنقود الطلقة المجرِّي» الذي تضمن تصادم عنقودين مجرِّيَّيْن (انظر الشكل ٢٠-٤) يُعَدُّ أقوى الأدلة التي توصَّلْنا إليها حتى الآن على أن المادة المظلمة هي السبب المُفسِّر لمثل هذه الظواهر، وليست نظريات الجاذبية المُعدَّلة. فتصادُم هذين العنقودين المجرِّيَّيْن أوضح أنهما يحتويان على نجوم وغاز ومادة مظلمة، والغاز الساخن في العنقود المجري يتفاعَل بقوة بالغة تجعل الغاز يتركَّز في منطقة التصادم المركزية. على الجانب الآخَر، لا تتفاعَل المادة المظلمة، أو على الأقل لا تتفاعَل كثيرًا؛ لذا خرجت هذه المادة من منطقة التصادم. وقد أوضحت قياسات عدسة الجاذبية أن المادة المظلمة انفصلت بالفعل عن الغاز الساخن على النحو نفسه الذي يشير إليه نموذج المادة المظلمة الضعيفة التفاعل والمادة العادية القوية التفاعل.

يقدِّم لنا كذلك إشعاع الخلفية الميكروني الخلفي — المذكور آنفًا — مزيدًا من الأدلة على وجود المادة المظلمة، لكن قياسات هذا الإشعاع، على عكس تأثير عدسة الجاذبية، لا توضِّح لنا أي شيء عن توزيع المادة المظلمة، بل توضح لنا صافي محتوى الطاقة التي تحملها المادة المظلمة، ومدى كِبر نسبتها في طاقة الكون ككلٍّ.

توضِّح لنا قياساتُ إشعاع الخلفية الميكروني الكوني الكثيرَ عن المراحل الأولى من عمر الكون، وتقدِّم لنا أيضًا معلوماتٍ مُفصَّلة عن خصائصه. ولا ترجح هذه القياسات صحة فكرة المادة المظلمة فحسب، وإنما تدعم كذلك وجود الطاقة المظلمة؛ فحسبما تشير



شكل ٢٠-٤: يوضِّح «عنقود الطلقة المجري» أن العناقيد المجرية تحتوي على مادة مظلمة، وأن ديناميكيات هذه العناقيد لا يمكن تفسيرها باستخدام قوانين الجاذبية المُعدَّلة. ويرجع ذلك إلى أنه يمكننا رؤية انفصال بين المادة العادية المتفاعلة بقوة — المحصورة في المنتصف عند تصادم العنقودين المجرِّيَّيْن — والمادة المظلمة الأضعف في تفاعلها بكثير من المادة العادية، والتي تُكتشَف باستخدام عدسة الجاذبية، وتخرج عن العنقودين بوضوح.

معادلات أينشتاين في النسبية العامة، لا يمكن للكون أن يكون مسطحًا إلا بتوفُّر الكمية اللازمة من الطاقة. والمادة — حتى مع حساب المادة المظلمة — لا تكفي لتسطح الكون الذي توضِّحه قياسات الكواشف المعلقة في المناطيد وتلك الخاصة بمسبار ويلكينسون لقياس اختلاف الموجات الميكرونية؛ ولذا لا بد من وجود طاقة أخرى، والطاقة المظلمة هي الشيء الوحيد الذي يمكن أن نعزو إليه تسطُّح الكون؛ حيث لا يحتوي الفضاء الثلاثي الأبعاد على أي منحنى قابِل للقياس، كما أن هذه الطاقة تتفق مع كافة القياسات الأخرى التي أُجرِيت حتى يومنا هذا.

والطاقة المظلمة، التي تحمل أغلب طاقة الكون — نحو ٧٠٪ منها — أكثر غموضًا من المادة المظلمة، والدليل الذي أقنع المجتمع الفيزيائي بوجود هذه الطاقة هو اكتشاف تسارُع تمدُّد الكون حاليًّا، على النحو نفسه الذي حدث أثناء تضخُّمِه في مرحلة مبكرة من عمره، لكن بمعدل أبطأ بكثير. ففي نهاية التسعينيات، فاجَأ فريقان بحثيان مستقلان

— وهما «مشروع المستعرات العظمى الفلكي»، و«فريق مستعرات هاي زد» — المجتمعَ الفيزيائيَّ عندما اكتشفَا أن معدل تمدُّد الكون لم يَعُدْ يتباطأ، بل على العكس يتسارع.

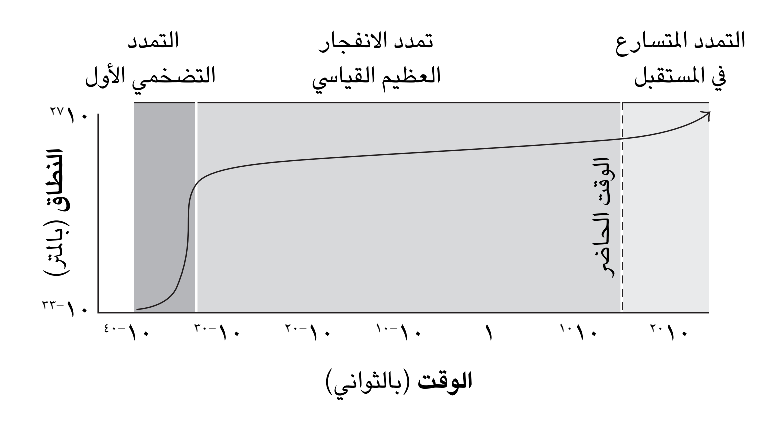
وقبل قياسات المستعرات العظمى، كانت هناك بعض العلامات التي تدل على وجود طاقة مفقودة، لكن الدليل على ذلك كان ضعيفًا، والقياسات الدقيقة التي تم إجراؤها في التسعينيات أوضحت أن المستعرات العظمى البعيدة كانت أكثر إعتامًا من المتوقع. ونظرًا لأن هذا النوع من المستعرات له نمط موحد من الانبعاثات يمكن التنبؤ به، فلا يمكن تفسير هذا الإعتام إلا بوجود شيء جديد، وهذا الشيء الجديد يبدو أنه التمدد المتسارع للكون، بمعنى أن الكون يتمدَّد بمعدل أسرع على نحو متزايد.

وهذا التسارع لا يمكن أن ينشأ عن المادة العادية التي يبطئ تجاذبُهَا التثاقلي من تمدُّد الكون. والتفسير الوحيد له هو أن الكون يشهد تضخُّمًا، لكن بمقدار طاقة أقل بكثير من مرحلة التضخُّم التي شهدها في مرحلة مبكرة من عمره، وهذا التسارع يمكن أن ينتج فقط عن شيء ينتهج نهج الثابت الكوني الذي اقترحه أينشتاين، وهو ما عُرِف فيما بعدُ باسم الطاقة المظلمة.

وعلى عكس المادة، تخلف الطاقة المظلمة ضغطًا سلبيًّا على البيئة التي توجد فيها. يؤدي الضغط الإيجابي العادي إلى الانهيار الداخلي، في حين يؤدي الضغط السلبي إلى التمدد المتسارع.[1] والمتسبب الأكثر وضوحًا للضغط السلبي — والذي يتفق مع القياسات التي أُجرِيت حتى الآن — هو الثابت الكوني الذي اقترحه أينشتاين، ويمثِّل هذا الثابت الطاقة والضغط الذي ينتشر في الكون، لكن لا تحمله المادة. والطاقة المظلمة هو المصطلح الشائع الذي نستخدمه الآن للسماح باحتمالية أن علاقة الثابت الكوني المفترضة بين الطاقة والضغط ليست صحيحة تمامًا، ولكنها تقديرية.

واليوم، تُعَدُّ الطاقة المظلمة العنصر المهيمن على إجمالي طاقة الكون، وهذا أمر غريب حقًّا؛ لأن كثافة الطاقة المظلمة ثبت أنها صغيرة للغاية. لم يكن لهذه الطاقة الغلبة إلا في مليارات الأعوام الأخيرة فقط؛ إذ كانت الغلبة في البداية للإشعاع، ومن بعده المادة، لكن الإشعاع والمادة المنتشرَيْن في حجم الكون الآخِذ في التزايد، يضعفان. على الجانب الآخَر، ظلَّتْ كثافة الطاقة المظلمة ثابتة، حتى مع نمو الكون، وبعد مرور هذه الفترة من عمر الكون، انخفضت كثافة الطاقة في الإشعاع والمادة انخفاضًا هائلًا؛ ما جعل الطاقة المظلمة، التي لا تتبدَّد، تسود في النهاية. وعلى الرغم من الحجم المتناهي الصغر للطاقة المظلمة، تحتم عليها أن تسود في النهاية. فبعد ١٠ مليارات عام من التمدد بمعدل آخِذ

في التناقص، ظهر أثر الطاقة المظلمة أخيرًا، وأسرع الكون في تمدُّده. وفي النهاية، لن يبقى في الكون سوى طاقة الفراغ، وسيتسارع تمدده وفقًا لهذه الطاقة (انظر الشكل ٢٠-٥). قد لا ترث هذه الطاقة الضعيفة الأرض، لكنها في طريقها لأن ترث الكون.



شكل ٢٠-٥: اختلف تمدد الكون باختلاف الفترات الزمنية. ففي مرحلة التضخم، تمدَّدَ الكون تمدُّدًا أسيًّا سريعًا، وساد بعد ذلك تمدُّد الانفجار العظيم القياسي بعد انتهاء مرحلة التضخم. أما الآن، فتعمل الطاقة المظلمة على تسارع معدل التمدد مجدَّدًا.

ألغاز أخرى

إن حتمية وجود الطاقة المظلمة والمادة المظلمة تثبت لنا أنه لا يمكننا الاعتداد بفهمنا لتطور الكون على النحو الذي يقترحه التوافُق المذهل بين النظرية الكونية والبيانات الكونية؛ فالجزء الأعظم من هذا الكون لا تزال ماهيته غامضة. وبعد مرور عشرين عامًا من الآن، قد يسخر الناس من مدى جهلنا.

ولا يقتصر هذا الغموض على الألغاز التي تثيرها طاقة الكون. فقيمة الطاقة المظلمة، على وجه التحديد، ما هي إلا جانب بسيط للغزٍ آخَر أكبر بكثير، وهو: لماذا تتسم الطاقة التي تتغلغل في الكون بحجمها الصغير للغاية؟ إذا كانت كمية الطاقة المظلمة أكبر، لكانت هيمنَتْ على المادة والإشعاع في مرحلة مبكرة من تطور الكون، وما كان الوقت

سمح بتكوُّن البنية (والحياة). وفوق كل ذلك، لا يعلم أحد العامل المسئول في تلك المرحلة المبكرة عن كثافة الطاقة العالية التي حثَّتْ على التضخُّم وعززته، لكن المشكلة الأكبر المتعلقة بطاقة الكون هي «مشكلة الثابت الكوني».

إذا اتبعنا مبادئ ميكانيكا الكم، فستكون قيمة الطاقة المظلمة المتوقعة أكبر بكثير مما هي عليه، سواء في أثناء التضخم أو الآن. فميكانيكا الكم تنص على أن الفراغ — الحالة التي لا توجد فيها جسيمات دائمة — هو في الواقع مليء بجسيمات سريعة الزوال تظهر وتختفي في الحال، هذه الجسيمات قصيرة العمر يمكن أن تحمل أي قدر من الطاقة، ويمكن أن تكون هذه الطاقة، في بعض الأحيان، كبيرة على نحو يصعب معه تجاهُل آثار الجاذبية. وهذه الجسيمات العالية الطاقة تمنح الفراغ قدرًا هائلًا من الطاقة، وهو القدر الذي يزيد عمَّا يمكن أن يسمح به التطور الطويل للكون. ولكي يبدو الكون بالصورة التي نراه عليها الآن، يجب أن تكون قيمة طاقة الفراغ أصغر بمقدار ١٢٠ قيمة أُسِّيَّة من الطاقة التي يمكن أن نتوقَّعها استنادًا إلى ميكانيكا الكم.

وهناك معضلة أخرى مرتبطة بهذه المسألة، وهي: لماذا تصادَفَ أن يعيش الإنسان الآن في وقت تتقارَبُ فيه كثافات طاقة كلٍّ من المادة والمادة المظلمة والطاقة المظلمة؟ لا ريب أن الطاقة المظلمة تهيمن على المادة، لكن نسبة هذه الهيمنة لا تتعدى ثلاثة أضعاف فقط. وإذا وضعنا في الاعتبار أن هذه الطاقات، من ناحية المبدأ، لها أصول مختلفة تمامًا، وأن أيًّا منها يمكن أن يسود الاثنتين الأخريين، فحقيقة تقارُب كثافاتها أمر غامض للغاية. وتبدو هذه المصادَفة غريبةً حقًّا؛ لأنها لم تتحقق إلا في الوقت الذي نعيش فيه (وهذا تقدير تقريبي)، ففي مرحلة مبكرة من عمر الكون، كانت الطاقة المظلمة تمثِّل نسبةً أصغر بكثير من مجموع طاقات الكون، وفيما بعدُ ستصير النسبة الأكبر، لكن في العصر الحالي فقط، تتقارب هذه المكونات الثلاثة: المادة العادية، والمادة المظلمة، والطاقة المظلمة.

لم يتم التوصُّل بعدُ إلى أي أجوبة للسؤالين: ما السبب وراء ضآلة كثافة الطاقة؟ ولماذا تتقارَب كميات موارد الطاقة المختلفة؟ يعتقد بعض الفيزيائيين، في الواقع، أنه ما من تفسير فعليٍّ لهذه الأمور، ويَرَون أننا نعيش في كون ذي قيمة غير مرجحة تمامًا من طاقة الفراغ؛ لأن أي قيمة أكبر كانت ستحول دون تكوُّنِ المجرات والبنية، بل دون تكوُّنِنا نحن البشر أيضًا، في الكون. فما كنَّا لنتواجد ونطرح الأسئلة عن قيمة الطاقة في كون ذي ثابت كوني أكبر. ويؤمن هؤلاء الفيزيائيون بأن هناك العديد من الأكوان،

وكل كون منها ينطوي على قيمة مختلفة من الطاقة المظلمة. ومن بين هذا العدد الكبير من الأكوان المحتملة، وحدها الأكوان التي يمكن أن تسمح بنشأة البنية هي التي يمكن أن تحتوينا. وقيمة الطاقة في هذا الكون صغيرة على نحو مذهل، وليس بوسع الحياةِ الظهورُ إلا في كونٍ بهذا القدر من الطاقة فقط. هذا المنطق يُسمَّى «المبدأ الإنساني» الذي تناولناه في الفصل الثامن عشر، وأنا لستُ مقتنعةً بهذا المنطق، مثلما سبق وأشرتُ في ذلك الفصل، ومع ذلك فلا أملك — وما من أحد غيري يملك — إجابة أفضل من هذه. ربما يكون تفسير قيمة الطاقة المظلمة أعقد الألغاز التي يواجهها علماء الكونيات وفيزياء الجسيمات في عصرنا الحالي.

بالإضافة إلى الألغاز المتعلقة بالطاقة، يوجد لغز كوني آخَر متعلِّق بالمادة، وهو: لماذا توجد مادة في الكون من الأساس؟ تتعامل معادلاتنا مع المادة والمادة المضادة على قدم المساواة، فهاتان المادتان تُفنِي إحداهما الأخرى عند التقائهما، ثم تختفيان. ومن المفترض ألَّا تظل هناك أي مادة أو مادة مضادة عندما يبرد الكون.

بينما لا تتفاعل المادة المظلمة كثيرًا؛ ومن ثَمَّ تظل موجودة في الأرجاء، تتفاعل المادة العادية كثيرًا بفعل القوة النووية القوية، وبدون إضافة أي شيء جديد على النموذج القياسي، من المفترض أن تكون أغلب المادة العادية التي نعرفها قد اختفت في الوقت الذي برد فيه الكون حتى وصل إلى درجة حرارته الحالية. والسبب الوحيد الذي يمكن أن تتخلف بسببه المادة هو سيادة المادة على المادة المضادة، لكن ذلك لا يظهر في صور النظريات البسيطة التي نعمل بها. لذا، نحن بحاجة للوصول إلى أسباب لوجود البروتونات وعدم عثورها على بروتونات مضادة لتفنى معها، ولا بد هنا من إدخال مفهوم اللاتناظر بين المادة والمادة المضادة في النموذج القياسي.

وكمية المادة المتبقية أصغر من المادة المظلمة، لكنها لا تزال تمثِّل جزءًا مهمًّا من الكون، وهي مصدر كل شيء نعرفه ونحبه، أما كيف نشأ هذا اللاتناظر بين المادة والمادة المضادة، ومتى حدث، فهو سؤال آخَر مهم يتوق علماء الكونيات وفيزياء الجسيمات للإجابة عنه.

ويظل، بالطبع، سؤال «ممَّ تتألَّف المادة المظلمة؟» من الأسئلة المهمة أيضًا، ربما سنتوصل في النهاية إلى أن النموذج الأساسي يربط بين كثافة المادة المظلمة وكثافة المادة، مثلما تشير الأبحاث الحديثة. وفي كافة الأحوال، فإننا نطمح إلى التعرف على المزيد من المعلومات عن المادة المظلمة قريبًا من التجارب التي سنستعرض الآن عينةً منها.

الفصل الحادي والعشرون

زوَّار من الجانب المظلم

أنهى لين إيفانز — كبير مهندسي مصادم الهادرونات الكبير — خطابه بالمؤتمر الذي عُقِد في كاليفورنيا حول المصادم والمادة المظلمة في يناير ٢٠١٠، بممازحة جمهوره من الفيزيائيين النظريين بشأن ما شهدوه من إخفاقات على مدار العقدين الأخيرين فيما يتعلَّق بموضوع المادة المظلمة، وأضاف قائلًا: «لقد أدركتُ الآن السبب وراء قضائي الخمسة عشر عامًا الأخيرة في تشييد مصادم الهادرونات الكبير.» كانت كلمات لين تشير إلى ندرة البيانات المتعلقة بالطاقة العالية على مدار السنوات السابقة، لكنها انطوت أيضًا على تلميحات بشأن إمكانية إلقاء اكتشافات المصادم الضوءَ على المادة المظلمة.

هناك الكثير من العلاقات التي تربط بين فيزياء الجسيمات وعلم الكونيات، لكن إحدى أهم هذه العلاقات تتمثَّل في أن المادة المظلمة قد تتكوَّن بالفعل في إطار الطاقات التي يستكشفها مصادم الهادرونات الكبير. والحقيقة المذهلة هي أنه إذا كان هناك بالفعل نوع مستقر من الجسيمات يحمل كتلة ضعيفة، فإن الطاقة التي يحملها هذا النوع من الجسيمات — والتي ترجع إلى المراحل المبكرة من عمر الكون — ستكون هي بالضبط ما نحتاج إليه لعزو المادة المظلمة إليه. ونتيجة الحسابات التي أُجرِيت للمادة المظلمة — التي لا تزال متبقية من المراحل الأولى من عمر الكون عندما كان ساخنًا ثم أخذ يبرد — تُثبِت أن هذا قد يكون صحيحًا. لا يعني ذلك أن المادة المظلمة موجودة أمام أعيننا فقط، وإنما يعني أيضًا أنه يمكننا معرفة هويتها. وإذا كانت هذه المادة مكوَّنة بالفعل من هذا الجسيم ذي الكتلة الضعيفة، فمصادم الهادرونات الكبير لن يمنحنا أجوبةً دقيقةً فحسب بشأن مسائل فيزياء الجسيمات، وإنما قد يقدِّم لنا أدلةً أيضًا بشأن ما يوجد في الكَوْن وكيف كانت البداية، وهذه هي المسائل التي يتناولها علم الكونيات.



شكل ٢١-١: يجري البحث عن المادة المظلمة باتباع منهج ثلاثي الأبعاد، فتبحث الكواشف الموجودة تحت سطح الأرض عن المادة المظلمة التي ترتطم مباشَرةً بالنوى المستهدفة. على جانب آخَر، يمكن لمصادم الهادرونات الكبير تكوين المادة المظلمة التي تخلِّف آثارًا لها في أجهزة التجارب. أما الأقمار الصناعية والتليسكوبات، فقد تعثر على أدلةٍ لفناء المادة المظلمة وإنتاجها مادة مرئية في الفضاء.

لكن تجارب مصادم الهادرونات الكبير ليست السبيلَ الوحيدَ للبحث عن المادة المظلمة؛ فقد دخلت الفيزياء حاليًّا عصرًا من البيانات قد يكون مثيرًا حقًّا، ليس فقط في مجال فيزياء الجسيمات، وإنما أيضًا في مجالَي الفلك وعلم الكونيات. ويوضِّح هذا الفصل كيف ستبحث التجارب في العقد القادم عن المادة المظلمة باتباع منهج ثلاثي الأبعاد: البعد الأول من هذا المنهج سيتناول الكشف عن السبب وراء ترجيح جسيمات المادة المظلمة ذات الكتلة الضعيفة، ثم كيف يمكن لمصادم الهادرونات الكبير إنتاج هذه الجسيمات والتعرُّف عليها في حالة صحة هذا الافتراض. وبعد ذلك، سنتناول كيف تبحث التجارب المصمَّمة خصوصًا للبحث عن جسيمات المادة المظلمة، عن وصول هذه الجسيمات إلى الأرض ومحاولتها تسجيل تفاعلاتها الواهنة، لكن القابلة للرصد في الوقت نفسه. وأخيرًا، سوف نتناول الطرق التي يمكن للتليسكوبات والكواشف الموجودة على الأرض وفي الفضاء البحث من خلالها عن نواتج جسيمات المادة المظلمة التي تفنى في السماء، وهذه السبل الثلاثة المختلفة للبحث عن المادة المظلمة موضَّحة في الشكل ٢١-١.

مادة شفافة

إن ما نعرفه عن المادة المظلمة هو كثافتها، وأنها باردة (ما يعني أنها تتحرك ببطء نسبي مقارَنةً بسرعة الضوء)، وأنها تتفاعل في الغالب على نحو ضعيف للغاية، فبالتأكيد ما من تفاعُل واضح لها مع الضوء. هذا كل ما نعرفه حتى الآن. المادة المظلمة شفافة، ولا نعرف كتلتها، وما إذا كانت تدخل في تفاعلات غير تفاعلات الجاذبية أم لا، وما إذا كانت قد نشأَتْ في مرحلة مبكرة من الكون. ما نعلمه هو متوسط كثافتها، لكن هذه الكثافة قد تكون نتاج توزيع كتلة مكافئة لكتلة بروتون واحد بكلِّ سنتيمترٍ مكعب في مجرتنا، وقد تكون نتاج حشد ألف تريليون مرة قدر كتلة البروتون في أجرام صغيرة موزَّعة في كل كيلومتر مكعب من الكون. كلتا هاتين القيمتين تساويان متوسط كثافة المادة المظلمة، وأيٌّ منهما قد تكون شكَّلت الأساس في تكوين بنية هذه المادة.

لذا، رغم علمنا بوجود المادة المظلمة، فإننا لا نعرف إلى الآن طبيعتها، فقد تكون ثقوبًا سوداء صغيرة أو أجسامًا من أبعاد أخرى، لكنها على الأرجح مجرد جسيمات أولية جديدة لا تدخل في تفاعلات النموذج القياسي المعتادة. وقد تكون هذه الجسيمات من البقايا المتعادلة المستقرة لنظرية فيزيائية سنكتشفها قريبًا والتي ستظهر في نطاق الكتلة الضعيفة. لكن حتى لو كان هذا هو الحال، فنحن نرغب في معرفة خصائص

جسيمات المادة المظلمة، وكتلتها، وتفاعلاتها، وما إذا كانت جزءًا من قطاع أكبر من الجسيمات الجديدة أم لا.

ومن أسباب ترجيح تفسير الجسيم الأولي حاليًّا تلك النقطة الموضحة فيما سبق؛ أَلَا وهي وفرة المادة المظلمة، ونسبة الطاقة التي تحملها، فهذه الأمور تدعم هذا الافتراض. لكن الحقيقة المدهشة هنا هي أن يكون لجسيم مستقر تدخل كتلته بالكاد في نطاق الطاقة الضعيفة التي سيستكشفها مصادم الهادرونات الكبير (ط = ك‌س٢)؛ «بقايا كثافة» موجودة حتى الآن — وهي نسبة الطاقة المخزنة في الجسيمات في الكون — وهي البقايا التي تشير التقديرات إلى أنها المادة المظلمة.

والمنطق في ذلك هو كما يلي: مع تطور الكون، انخفضت درجة حرارته، والجسيمات الثقيلة التي كانت موجودة بوفرة عندما كان الكون أكثر سخونة، تشتَّتَتْ مع انخفاض درجة حرارته؛ وذلك لأن الطاقة عند درجة الحرارة المنخفضة لا تكفي لتكوين هذه الجسيمات، وعندما انخفضت درجة الحرارة إلى حدٍّ معين، فَنَتِ الجسيمات الثقيلة مع الجسيمات الثقيلة المضادة، واختفت كلتاهما. والعملية العكسية التي كانت تؤدي إلى نشأة هذه الجسيمات من جديد لم تَعُدْ تحدث بمعدل كبير. من ثَمَّ، ونتيجة لهذا الإفناء، انخفضت الكثافة العددية للجسيمات الثقيلة على نحو سريع للغاية مع انخفاض حرارة الكون.

بالطبع، لكي تفنى الجسيمات والجسيمات المضادة، كان لا بد أن تعثر هذه الجسيمات على بعضها البعض أولًا.[1] لكن مع انخفاض عددها وتشتُّتها، صار من الصعب حدوث ذلك؛ ومن ثَمَّ تراجَعَ إفناء الجسيمات لبعضها البعض في المراحل التالية من تطوُّر الكون؛ لأن هذا الأمر تطلَّبَ وجود اثنين من هذه الجسيمات في مكان واحد ليتحقَّق.

وكانت النتيجة هي إمكانية بقاء الجسيمات ذات الكتلة الضعيفة الأكثر استقرارًا حتى يومنا هذا، الأمر الذي قد لا يرجِّحه التطبيقُ الساذج لقوانين الديناميكا الحرارية، التي تنص على أنه في مرحلة ما، صارت الجسيمات والجسيمات المضادة خفيفةً للغاية، مما حال دون عثورها على بعضها البعض، وتبديد كلٍّ منها للأخرى. وعدد الجسيمات المتبقِّية حتى يومنا هذا يعتمد على المادة المظلمة المحتملة وتفاعلاتها. يعلم الفيزيائيون كيف يحسبون وفرة الآثار الباقية عند معرفتهم بهذه الكميات، والحقيقة المذهلة هنا هي أن الجسيمات المستقرة ذات الكتلة الضعيفة تحمل من الخصائص ما يجعلها تتبقَّى بالوفرة اللازمة لأن تشكِّل المادة المظلمة.

وبالطبع، نظرًا لأننا لا نعرف الكتلة الفعلية للجسيم، ولا تفاعلاته على وجه التحديد (ناهيك عن النموذج الذي قد ينتمي إليه هذا الجسيم المستقر)، فنحن لا نعرف إلى الآن ما إذا كانت الأرقام صحيحة أم لا. لكن الاتفاق التصادفي — وإن كان تقريبيًّا فقط — بين الأرقام المرتبطة بظاهرتين تبدوان مختلفتين تمامًا؛ مدهش حقًّا، وقد يمثِّل دليلًا على أن فيزياء النطاق الضعيف هي المسئولة عن المادة المظلمة في الكون.

هذا النوع المرجح للمادة المظلمة صار يُعرَف، بوجه عام، باسم «الجسيم الضخم الضعيف التفاعل». وكلمة «ضعيف» هنا كلمة وصفية، وليست إشارةً إلى القوة الضعيفة؛ فهذا الجسيم يمكن أن يتفاعَل على نحوٍ أضعف من نيوترينونات النموذج القياسي الضعيفة التفاعل. ودون مزيد من الأدلة على المادة المظلمة وخصائصها التي قد يكشف عنها مصادم الهادرونات الكبير، لن نعلم ما إذا كانت هذه المادة تحتوي بالفعل على هذه الجسيمات الضخمة الضعيفة التفاعل أم لا؛ لذا نحن بحاجة لأبحاث تجريبية مثل تلك التي سنتناولها فيما يلي.

المادة المظلمة في مصادم الهادرونات الكبير

إن الاحتمالية المثيرة لإنتاج المادة المظلمة تمثِّل أحد أسباب اهتمام علماء الكونيات بفيزياء نطاق الطاقة الضعيفة وما يمكن أن يعثر عليه مصادم الهادرونات الكبير. فهذا المصادم يحتوي على القدر اللازم من الطاقة للبحث عن الجسيمات الضخمة الضعيفة التفاعل، وإذا كانت المادة المظلمة تتألَّف بالفعل من جسيم يرتبط بنطاق الطاقة الضعيفة مثلما تشير الحسابات الموضحة أعلاه، فقد تتكون هذه المادة في مصادم الهادرونات الكبير.

لكن، حتى إن حدث ذلك، فهو لا يعني بالضرورة اكتشاف جسيم المادة المظلمة، فهذه المادة لا تتفاعَل كثيرًا. ونظرًا للتفاعلات المحدودة مع مادة النموذج القياسي، فلن تُنتَج جسيمات المادة المظلمة أو يُعثَر عليها مباشَرةً بالتأكيد في الكواشف، حتى إن أُنتِجت، فسوف تفنى سريعًا. ومع ذلك، لا يُفقَد كل شيء (حتى وإن فُقِد جسيم المادة المظلمة). وأي حل لمشكلة التسلسل الهرمي سيتضمَّن جسيمات أخرى، معظمها يدخل في تفاعلات أقوى. بعض من هذه الجسيمات قد تُنتَج بوفرة؛ ومن ثَمَّ تتحلَّل إلى المادة المظلمة التي تنقل بعد ذلك طاقة وزخمًا لا يُكتشَفان.

وتُعَدُّ نماذج التناظر الفائق أكثر نماذج النطاق الضعيف المدروسة جيدًا، التي تحتوي على نحو طبيعي على المادة التي من المحتمل أن تكون المادة المظلمة. وإذا انطبق

التناظر الفائق في عالمنا، فقد يكون أخف جسيم فائق التناظر هو المادة المظلمة. وهذا الجسيم الأخف وزنًا، الذي لا يحمل أي شحنة كهربية، يتفاعل تفاعلًا ضعيفًا للغاية بما يمنع إنتاجه من تلقاء نفسه والعثور عليه. لكن الجلووينوات — وهي النظائر الفائقة للجلوونات التي تنقل القوة القوية — والنظائر الفائقة للكواركات ستتكون إذا كانت جسيمات المادة المظلمة موجودةً وكانت لها الكتلة الصحيحة. ومثلما أوضحنا في الفصل السابع عشر، هذان النوعان من جسيمات التناظر الفائق سيتحللان في النهاية إلى أخف الجسيمات الفائقة التناظر؛ ومن ثَمَّ، على الرغم من أن جسيم المادة المظلمة لن يُنتَج مباشَرةً، فإن عمليات تحلُّلِ الجسيمات الأخرى الأكثر وفرةً يمكن أن تكوِّن أخفَ الجسيمات الفائقة التناظر بمعدل ملحوظ.

يتحتم أيضًا إنتاجُ سيناريوهات أخرى للمادة المظلمة الضعيفة النطاق، التي تؤدِّي إلى نتائج يمكن اختبارها، و«الكشف عنها» بنفس هذا الأسلوب. ومن المفترض أن تكون كتلة جسيم المادة المظلمة في حدود نطاق الطاقة الضعيفة التي سيدرسها مصادم الهادرونات الكبير. هذه الجسيمات لن تتكوَّنَ مباشَرةً، بسبب ضعف تفاعلها، لكن الكثير من النماذج تحتوي على جسيمات أخرى جديدة يمكن أن تتحلَّل إليها. وفي هذه الحالة، يمكننا أن نعلم بوجود جسيم المادة المظلمة، وربما كتلتها أيضًا، عن طريق الزخم المفقود الذي تحمله بعيدًا.

لا ريب أن العثور على المادة المظلمة في مصادم الهادرونات الكبير سيكون إنجازًا مهمًّا بحق. فإن وُجِدت هذه المادة، سيتمكَّن الفيزيائيون التجريبيون من دراسة بعض من خصائصها بالتفصيل. لكن إثبات فكرة أن جسيمًا ما موجودًا في مصادم الهادرونات الكبير هو الذي تتألَّف منه المادة المظلمة؛ يتطلَّب أدلةً أخرى تكميلية، وهذا ما قد تقدِّمه الكواشف الموجودة على الأرض وفي الفضاء.

تجارب الكشف المباشِر عن المادة المظلمة

لا شك أن إمكانية تخليق مصادم الهادرونات الكبير للمادة المظلمة مثيرة حقًّا، لكن تجارب علم الكونيات لا تُجرَى في المعجِّلات، وإنما التجارب التي تُجرَى على الأرض وفي الفضاء للأبحاث الفلكية والبحث عن المادة المظلمة هي المسئولة بشكل أساسي عن فهمنا للحلول الممكنة للأسئلة الكونية، وتطوير هذا الفهم.

بالطبع، تفاعلات المادة المظلمة مع المادة العادية ضعيفةٌ للغاية؛ لذلك تعتمد الأبحاث الحالية على الإيمان الراسخ بأن المادة المظلمة — رغم أنها تكاد تكون غير مرئية — تتفاعل بضعف (لكن تفاعلها ليس مستحيلًا) مع المادة التي نعرفها (ويمكن أن تُبنَى كواشف لرصد هذا التفاعل). ليس ذلك مجرد تخمينٍ نطمح فيه، وإنما هو استنتاج قائم على نفس حساب بقايا الكثافة التي ذكرناها فيما سبق، والذي يوضِّح أنه إذا كانت المادة المظلمة مرتبطةً بالنماذج المقترحة لتفسير مشكلة التسلسل الهرمي، فإن كثافة الجسيمات المتبقية ستمثِّل الكميةَ الصحيحة اللازمة لملاحظات المادة المظلمة. والكثير من الجسيمات الضخمة الضعيفة التفاعل المرشحة لأن تكون هي الجسيمات التي تتألَّف منها المادة المظلمة، والتي يقترحها هذا الحساب؛ تتفاعل مع جسيمات النموذج القياسي بمعدلات يمكن الكشف عنها باستخدام الجيل الحالي من كواشف المادة المظلمة.

رغم ذلك، ونظرًا للتفاعلات الضعيفة للمادة المظلمة، يتطلَّب البحث إما كواشف ضخمة على الأرض، وإما كواشف بالغة الحساسية تبحث عن نواتج التقاء المادة المظلمة وفنائها وتكوينها لجسيمات جديدة والجسيمات المضادة لها على الأرض أو في الفضاء. إن المرء لا يفوز، على الأرجح، باليانصيب إذا اشترى بطاقة واحدة فقط، لكنه إذا اشترى أكثر من نصف عدد البطاقات المتوفرة، فاحتمالات فوزه ستكون جيدة بالتأكيد. من المنطلق ذاته، لدى الكواشفِ الضخمة فرصةٌ معقولة للعثور على المادة المظلمة، بالرغم من أن تفاعُلَ هذه المادة مع أي نوكليون واحد في الكاشف يكون ضئيلًا للغاية.

والمهمة الصعبة لكواشف المادة المظلمة هي الكشف عن جسيمات المادة المظلمة المتعادلة — أي العديمة الشحنة — ثم تمييزها عن الأشعة الكونية أو غيرها من أشعة الخلفية. الجسيمات العديمة الشحنة لا تتفاعل مع الكواشف بالطرق التقليدية، والأثر الوحيد الدال على جسيم المادة المظلمة، الذي يمر عبر الكاشف، هو نتيجة ارتطام النوى في الكاشف وتغيُّر طاقتها بمقدار ضئيل. ونظرًا لأن هذه هي النتيجة الوحيدة المرصودة، فإن كواشف المادة المظلمة ليس أمامها خيار سوى البحث عن أدلة على كميات ضئيلة للغاية من الحرارة أو طاقة الارتداد التي تكوَّنَتْ عند مرور جسيمات المادة المظلمة؛ ولذلك صُمِّمت الكواشف لتكون إما باردة جدًّا، وإما حساسة للغاية من أجل تسجيل رواسب الطاقة أو الحرارة البسيطة من جسيمات المادة المظلمة التي ترتَدُّ ارتدادًا دقيقًا.

والأجهزة الشديدة البرودة، المعروفة باسم «الكواشف التبريدية»، تكشف عن الكميات الصغيرة من الحرارة المنبعثة عند دخول جسيم المادة المظلمة إلى الجهاز.

إن كمية الحرارة الصغيرة التي تدخل إلى كاشف ساخِن بالفعل يكون من الصعب للغاية ملاحظتها، لكن مع استخدام الكواشف الباردة المصمَّمة خصوصًا لهذا الغرض، يمكن امتصاص رواسب الطاقة البسيطة وتسجيلها. والكواشف التبريدية مصنوعة من مادة ماصة بلورية، مثل الجرمانيوم. من أمثلة هذا النوع التجاربُ المعروفة بالأسماء التالية: «البحث البارد عن المادة المظلمة»، و«البحث البارد عن الأحداث النادرة بمقاييس حرارة فائقة التوصيل»، و«تجربة الكشف عن جسيمات المادة المظلمة تحت الأرض».

أما الفئة الأخرى من تجارب الكشف المباشر، فتشمل كواشف السوائل النبيلة. فرغم أن المادة المظلمة لا تتفاعَل مباشَرةً مع الضوء، فإن الطاقة المضافة إلى ذرة الزينون أو الأرجون عند ارتطام جسيم المادة المظلمة بها، يمكن أن تؤدي إلى لمعة من وميض مميز. ومن التجارب التي تستخدم الزينون تجربة «زينون ١٠٠»، و«لوكس»، وغيرهما من تجارب السوائل النبيلة الأخرى، إضافة إلى تجربتَيْ «زيبلين»، و«تجربة الأرجون للكشف عن المادة المظلمة».

يتطلع مجتمع الفيزيائيين النظريين والتجريبيين بأسره إلى معرفة النتائج الجديدة التي ستسفر عنها هذه التجارب، وقد أسعدني الحظ بالتحدث في أحد المؤتمرات حول المادة المظلمة في معهد كافلي للفيزياء النووية بمدينة سانتا باربرا في ديسمبر ٢٠٠٩. نظَّمَ هذا المؤتمر اثنان من كبار الخبراء في مجال المادة المظلمة، وهما دوج فينكباينر ونيل وينر. كانت تجربة «البحث البارد عن المادة المظلمة» — وهي إحدى أدق تجارب الكشف عن المادة المظلمة — آنذاك على وشك إصدار نتائج جديدة، وكان دوج ونيل من العلماء الشباب المعاصرين الذين حصلوا على درجة الدكتوراه معًا في بيركلي، وتمتَّعَ كلاهما بفهم عميق لتجارب المادة المظلمة، وما قد تتوصَّل إليه من نتائج. تميَّزَ نيل بمعرفته الأوسع بفيزياء الجسيمات، أما دوج فقد أجرى عددًا أكبر من الأبحاث في مجال الفيزياء الفلكية، لكنهما تعاوَنَا في دراسة موضوع المادة المظلمة عندما صار واضحًا أن هذا الموضوع يتناول كلا الفرعين المعرِفِيَّيْنِ اللذين تخصَّصَا فيهما. وفي ذلك المؤتمر، جمع نيل ودوج الروَّاد من خبراء النظريات والتجارب في هذا الموضوع.

أُلقيتْ أكثر الخطب تشويقًا في ذلك اليوم صبيحة وصولي إلى المؤتمر. تحدَّثَ في هذه الخطبة هاري نيلسون، وهو أستاذ بجامعة كاليفورنيا في سانتا باربرا، عن النتائج التي توصَّلَتْ إليها تجربة «البحث البارد عن المادة المظلمة» قبل ذلك الحين بعام. ولعلك تتساءل عمَّا قد يثير كل هذا الاهتمام بنتائج مضى عليها عام كامل. يرجع السبب في

ذلك إلى أن جميع مَن حضروا ذلك المؤتمر كانوا على علم بأنه بعد ثلاثة أيام فقط، ستصدر هذه التجربة بيانات جديدة، وانتشرت شائعات بأن علماء هذه التجربة قد رَأَوا بالفعل أدلةً مثيرةً على اكتشاف ما؛ ومن ثَمَّ أراد الجميع فهم التجربة على نحو أفضل. لقد استمع الفيزيائيون النظريون على مدار أعوام طويلة لخطب حول الكشف عن المادة المظلمة، لكنهم استمعوا فقط للنتائج، ولم يهتموا كثيرًا بالتفاصيل، لكن بعد أن صار الاكتشاف الوشيك للمادة المظلمة أمرًا محتملًا، تحمَّسَ الفيزيائيون النظريون لمعرفة المزيد من المعلومات. وفي وقت لاحق من ذلك الأسبوع صدرت النتائج، لكنها جاءت مخيِّبة للآمال التي انعقدت عليها التوقعات المبالَغ فيها للعلماء الذين حضروا ذلك المؤتمر. لكن في الوقت الذي ألقى فيه هاري الخطاب، كان الجميع منشغلًا للغاية بما يقوله، ونجح هاري في إلقاء خطابه بثقة، رغم الأسئلة العديدة التي تخلَّلَتِ الحديث عن النتائج التي أوشكت التجربة على التوصُّل إليها.

ونظرًا لأن هذا العرض غير الرسمي قد استغرق ساعتين، تمكَّنَ الحضور من مقاطعة هاري متى كان ذلك ضروريًّا ليتوصَّلوا إلى أكبر قدر ممكن من الفهم. وتم تناول أسئلة الحضور على نحو لطيف، والتي تعلَّقَ أغلبها بالجوانب التي يراها فيزيائيو الجسيمات محيِّرة. وكان هاري، الذي تدرَّبَ كفيزيائي جسيمات وليس عالم فلك، يتحدَّث على نحو يسهل علينا فهمه.

في هذه التجارب الشديدة الصعوبة التي تتناول المادة المظلمة، يكمن الشيطان في التفاصيل، وهذا ما أوضحه هاري بصراحة. فتقوم تجربة «البحث البارد عن المادة المظلمة» على تكنولوجيا فيزياء الطاقة الضعيفة المتقدمة، وهي التكنولوجيا التي ترتبط عادةً بمن يُعرَفون بفيزيائيي المادة المكثفة أو الحالة الصلبة. روى لنا هاري كيف أنه قَبْلَ اشتراكه في هذه التجربة، ما كان ليصدق أبدًا أن هذا النوع من عمليات الكشف الدقيقة للغاية يمكن أن ينجح، مازحًا بأن زملاءه بالتجربة يجب أن يكونوا شاكرين لأنه لم يكن من بين أعضاء لجنة التحكيم التي صدَّقت على المقترح الأولي للتجربة.

تختلف آلية عمل تجربة «البحث البارد عن المادة المظلمة» اختلافًا كبيرًا عن تجارب الكشف عن المادة المظلمة التي تستخدم يوديد الصوديوم والزينون الوامض. فتضم هذه التجربة قطعًا بحجم أقراص الهوكي من الجرمانيوم أو السيليكون يعلوها جهاز تسجيل دقيق، وهو مجس فونونات. ويعمل الكاشف عند درجة حرارة منخفضة للغاية؛ ما يجعله يقع على الحد الفاصل بين الموصلية الفائقة والموصلية غير الفائقة. وإذا ارتطمت

بالكاشف كمية — حتى إن كانت ضئيلةً للغاية — من الفونونات (وهي وحدات الصوت التي تحمل الطاقة عبر الجرمانيوم أو السيليكون، وتعادِل الفوتونات التي تمثِّل وحدات الضوء)؛ فستكفي هذه الكمية لجعل الجهاز يفقد موصليته الفائقة ويسجِّل حدثًا محتملًا للمادة المظلمة بواسطة جهاز يُسمَّى «جهاز التداخل الكمي الفائق التوصيل». تتمتع هذه الأجهزة بدقة متناهية، وتسجل رواسب الطاقة بكفاءة عالية للغاية.

لكن الأمر لا يتوقَّف عند تسجيل حدث ما؛ إذ يلزم على القائمين على التجربة إثبات أن الكاشف يسجِّل المادة المظلمة، وليس إشعاع الخلفية فحسب. وتكمن المشكلة هنا في أن أي شيء تنبعث منه إشعاعات؛ فأجسامنا تبعث إشعاعات، الكمبيوتر الذي أكتب عليه الآن يبعث إشعاعات، والكتاب (أو الجهاز الإلكتروني) الذي تقرأ فيه الآن يبعث إشعاعات. ويكفي مقدار العرق الموجود على أصبع عالم تجارب واحد لإفساد أي علامة تدل على المادة المظلمة. هذا ناهيك، بالطبع، عن جميع المواد المشعة الأولية والمصنعة؛ فالبيئة والهواء والكاشف نفسه يحمل أشعة. يمكن أيضًا للأشعة الكونية أن ترتطم بالكاشف، ويمكن أن تتشابه النيوترونات المنخفضة الطاقة الموجودة في الصخور مع المادة المظلمة، ويمكن لميوونات الأشعة الكونية الارتطام بالصخور وإحداث لطخ من المواد التي تتضمن النيوترونات التي تشبه المادة المظلمة أيضًا. ويبلغ عدد أحداث الأشعة الخلفية الكهرومغناطيسية ١٠٠٠ مرة أحداث الإشارات المتوقعة، حتى مع الافتراضات المتفائلة العقلانية المتعلقة بكتلة جسيمات المادة المظلمة وقوة تفاعلها.

لذلك، فإن اسم التقنية المُستخدَمة في تجارب المادة المظلمة هو «الحجب والتمييز» (وهذا المصطلح الذي يستخدمه الفيزيائيون الفلكيون. أما فيزيائيو الجسيمات، فيستخدمون الاسم الأكثر صوابًا، وهو «التعرف على الجسيمات»، وإن كنتُ أشك حاليًّا في صحة هذا الاسم أيضًا). يحتاج القائمون على التجربة إلى حجب الكاشف الذي يستخدمونه قدر الإمكان للحيلولة دون دخول أي إشعاعات إليه وتمييز أحداث المادة المظلمة المحتمل وقوعها عن التشتُّت غير المهم للأشعة في الجهاز. ويتحقَّق الحجب جزئيًّا عن طريق إجراء التجارب على أبعاد عميقة في المناجم. وتكمن الفكرة هنا في أن الأشعة الكونية سترتطم بالصخور المحيطة بالكاشف قبل وصولها إليه، أما المادة المظلمة، التي تتفاعل على نحو أقل بكثير، فسوف تصل إلى الكاشف دون أن يعوقها هذا الحجب.

ولحسن حظ عمليات الكشف عن المادة المظلمة، يوجد العديد من المناجم والأنفاق في العالم. على سبيل المثال، تُجرَى «تجربة داما لاكتشاف المادة المظلمة» — إلى جانب تجربة

«زينون ١٠» والنسخة الأكبر منها «زينون ١٠٠»، وتجربة «البحث البارد عن الأحداث النادرة بمقاييس حرارة فائقة التوصيل»، وهي عبارة عن كاشف يستخدم التنجستين — في مختبر «جران ساسو» المُشيَّد داخل نفق في إيطاليا يقع على عمق ٣٠٠٠ متر تحت سطح الأرض. ومن المزمع أيضًا أن تُقام تجربة «لوكس» القائمة على استخدام الزينون في تجويف بعمق ١٥٠٠ متر في منجم «هوم ستيك» بولاية ساوث داكوتا بالولايات المتحدة، والذي شُيِّد في الأساس لاستكشاف الذهب، وستُجرَى هذه التجربة في التجويف ذاته الذي اكتشف فيه راي ديفيز النيوترينوات الناتجة عن التفاعلات النووية التي كانت تحدث في الشمس. أما تجربة «البحث البارد عن المادة المظلمة»، فستُجرَى في منجم «سودان» بالولايات المتحدة الموجود على عمق نحو ٧٥٠ مترًا تحت سطح الأرض.

لكن كمية الصخور الموجودة فوق المناجم والأنفاق ليست كافية لضمان عدم وصول الإشعاعات إلى الكواشف؛ ومن ثَمَّ يعمل العلماء على تعزيز حجب الكواشف الفعلية بأساليب عدة. على سبيل المثال، تحيط بتجربة «البحث البارد عن المادة المظلمة» طبقة من البولي إيثيلين الذي يضيء عندما يدخل إلى التجربة شيء من الخارج يتفاعل بقوة بالغة تستبعد كونه المادة المظلمة. ومن وسائل الحجب المميزة أيضًا في هذه التجربة الرصاص المحيط بها والذي ينتمي إلى سفينة فرنسية قديمة غارقة يعود تاريخها إلى القرن الثامن عشر. فقَدَ هذا الرصاصُ القديم، الذي ظل تحت المياه قرونًا طويلة، نشاطَه الإشعاعي بفضل هذه الفترة الزمنية؛ وبذلك صار مادة ماصة كثيفة مثالية لحجب الكاشف عن الأشعة التي تصل إليه.

لكن في ظل كل هذه الاحتياطات، تظل هناك الكثير من الأشعة الكهرومغناطيسية. والتفريق بين الإشعاع والمادة المظلمة المحتملة يتطلَّب مزيدًا من التمييز. تشبه تفاعلات المادة المظلمة التفاعلات النووية التي تحدث عند اصطدام نيوترون ما بالهدف؛ لذا في مقابل نظام قراءة الفونونات يوجد كاشف تقليدي لفيزياء الجسيمات يعمل على قياس التأين الناتج عن مرور جسيمات المادة المظلمة المحتملة بالجرمانيوم أو السيليكون. وهذان القياسان معًا — التأيُّن وطاقة الفونونات — يميزان الأحداث النووية — وهي العمليات المرغوبة التي قد تنتج عن المادة المظلمة — من الأحداث الناتجة عن الإلكترونات، التي قد لا تتعدى كونها نتائج للنشاط الإشعاعي فحسب.

من الخصائص المميزة أيضًا لتجربة «البحث البارد عن المادة المظلمة» القياسات الزمنية والمكانية المذهلة التي يمكن لهذه التجربة إجراؤها. وهذه خاصية جيدة؛ لأنه

رغم أن الموضع يُقاس مباشَرةً في اتجاهين فقط، فإن توقيت الفونونات يمنح المكان الإحداثي الثالث؛ لذا يمكن للعلماء أن يحدِّدوا بالضبط المكان الذي وقع فيه الحدث ويتجاهلوا الأحداث السطحية المتعلقة بالأشعة الخلفية. من الميزات الجيدة أيضًا لهذه التجربة أنها مقسمة إلى كواشف متكدسة بحجم أقراص الهوكي، والحدث الحقيقي لا يقع إلا في أحد هذه الأجهزة فقط. على الجانب الآخَر، الإشعاع الناتج في الكاشف نفسه لا يقتصر وجوده بالضرورة على كاشف واحد فقط. بفضل كل هذه الميزات، والتصميم الأفضل المنتظر لهذه التجربة، فإن لديها فرصة جيدة للعثور على المادة المظلمة.

مع ذلك، ورغم ما تنطوي عليه تجربة «البحث البارد عن المادة المظلمة» من جوانب مبهرة، فهي ليست التجربة الوحيدة المستخدمة للكشف عن المادة المظلمة، ولا تقتصر الكواشف عن هذه المادة على الأجهزة التبريدية فحسب أيضًا. ففي وقت لاحق من الأسبوع الذي عُقِد فيه مؤتمر معهد كافلي للفيزياء النووية، عرضت إلينا أباريل — وهي من الرواد في تجارب الزينون — تفاصيل مماثلة للتجربتين اللتين عملت بهما (وهما «زينون ١٠» و«زينون ١٠٠»)، بالإضافة إلى التجارب الأخرى التي تُجرَى باستخدام السوائل النبيلة، واهتم الحضور بحديثها اهتمامًا بالغًا أيضًا؛ لأن هذا النوع من التجارب سيصير قريبًا أدق أنواع كواشف المادة المظلمة.

تسجل تجارب الزينون أحداث المادة المظلمة عن طريق وميضها. فالزينون السائل كثيف ومتجانس، ويحمل كتلة كبيرة في كل ذرة (الأمر الذي يعزز من معدل تفاعل المادة المظلمة)، ويومض على نحو جيد، ويتأين سريعًا عندما تترسب الطاقة بحيث يمكن تمييز العلامتين الموضحتين فيما سبق عن الأحداث الكهرومغناطيسية، هذا فضلًا عن أنه رخيص نسبيًّا مقارنةً بالمواد الأخرى التي يمكن استخدامها، وإن كان سعره قد تأرجَحَ بمعدل ستة أضعاف في خلال عقد من الزمان. وقد شهد هذا النوع من تجارب الغازات النبيلة تحسنًا مع تزايد حجمها، ومن المفترض أن تواصِل هذا التحسن. ومع تزايد المادة، لا تزيد احتمالية الاكتشاف فحسب، وإنما يمكن أيضًا للجزء الخارجي من الكاشف أن يحجب الجزء الداخلي منه على نحو أكثر فعالية، ما يساعد في ضمان التوصُّل إلى نتائج مهمة.

وعن طريق قياس كلٍّ من التأين والوميض الأولي، يميِّز العلماء الإشارة الدالة على المادة المظلمة عن إشعاع الخلفية الكوني. فعلى سبيل المثال، تستخدم تجربة «زينون ١٠٠» صماماتٍ ضوئيةً صُمِّمَتْ خصوصًا للعمل في بيئة الكاشف المنخفضة الحرارة

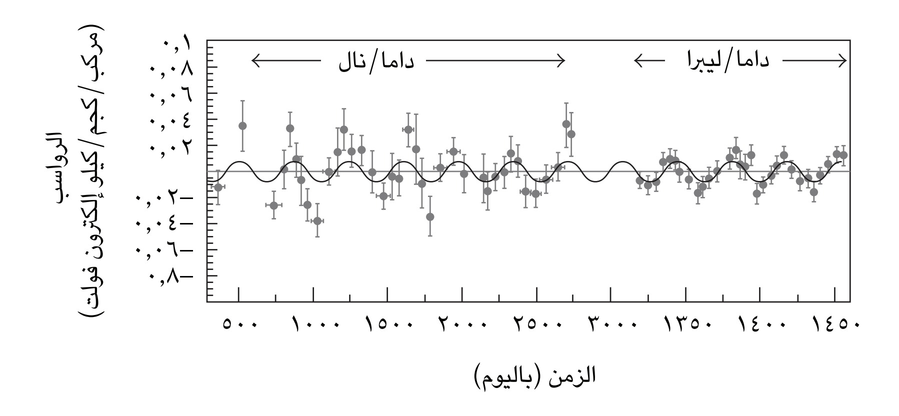
والعالية الضغط لقياس الوميض. ويمكن أن توفِّر الكواشف التي تعمل بالأرجون معلومات أفضل عن الوميض في المستقبل عن طريق استخدامها للشكل المفصل لنبضة الوميض كدالة زمنية، الأمر الذي يساعد أيضًا في الفصل بين الأحداث المهمة وغير المهمة.

والغريب في الوضع الراهن (وإن كان من المرجح أن يتغيَّر ذلك قريبًا) أن إحدى تجارب قياس الوميض، وهي تجربة «داما لاكتشاف المادة المظلمة» الموجودة في مختبر جران ساسو في إيطاليا، قد رصدت بالفعل إحدى الإشارات. وتجربة داما، على عكس التجارب الأخرى التي وصفتها فيما سبق، ليس بها تمييز داخلي بين إشارة المادة المظلمة وإشعاع الخلفية الكوني، وإنما تعتمد بدلًا من ذلك على التعرُّف على الأحداث الفردية للمادة المظلمة على أساس التبعية الزمنية لهذه الأحداث فقط، وذلك عن طريق استخدام تبعية السرعة الناتجة عن دوران الأرض حول الشمس.

والسبب وراء أهمية سرعة جسيمات المادة المظلمة الداخلة إلى الكاشف، هو أن هذه السرعة تحدد مقدار الطاقة التي تترسب في الجهاز. فإذا كانت هذه الطاقة منخفضة للغاية، فلن تكون التجربة بالدقة الكافية لمعرفة ما إذا كان هناك شيء موجود أم لا. وزيادة الطاقة تعني أن التجربة ستسجل الحدث على الأرجح. ونظرًا لسرعة دوران الأرض، تعتمد سرعة المادة المظلمة بالنسبة لنا (ومن ثَمَّ الطاقة المترسبة عنها) على الوقت المحدد من العام، فيسهل رؤية الإشارات في بعض الأوقات من العام (الصيف) مقارنةً بأوقات أخرى (الشتاء). وتبحث تجربة داما عن التغيير السنوي في معدل الأحداث الذي يتفق مع هذا التنبؤ، وتشير البيانات التي توصَّلَتْ إليها هذه التجربة إلى أنها قد عثرت على إحدى الإشارات. (انظر الشكل ٢١-٢ للاطلاع على بيانات تذبذبات تجربة داما.)

ما من أحد يعرف على وجه اليقين ما إذا كانت الإشارة التي توصَّلَتْ إليها تجربة داما تمثِّل المادة المظلمة أم إنها ناتجة عن سوء فهم محتمل بشأن الكاشف أو بيئته. والسبب وراء هذا التشكُّك هو عدم توصُّل أي تجربة أخرى لأي إشارة مماثلة، وهذا الغياب لأي إشارات أخرى لا يتماشى مع تنبؤات معظم نماذج المادة المظلمة.

وبالرغم مما يثيره ذلك من حيرة في الوقت الراهن، فهذا هو بالضبط ما يجعل العلم مشوقًا، فتشجعنا هذه النتيجة على التفكير في الأنواع المختلفة المحتملة للمادة المظلمة، وما إذا كانت هذه المادة لها خصائص تيسِّر من اكتشاف تجربة داما لها، مقارنةً بتجارب اكتشاف المادة المظلمة الأخرى. تدفعنا هذه النتيجة أيضًا لفهم الكواشف على نحو أفضل كي نتمكن من التعرف على الإشارات الزائفة، ونحدِّدَ ما إذا كانت البيانات تعني ما يدَّعِيه القائمون على التجارب بالفعل أم لا.



شكل ٢١-٢: بيانات صادرة عن تجربة داما توضِّح التغيير في الإشارة بمرور الوقت.

تعمل تجارب أخرى بجميع أنحاء العالم على تحقيق مستوًى أعلى من الدقة، ويمكن أن تستبعدَ هذه التجارب اكتشافَ المادة المظلمة الذي توصَّلت إليه تجربة داما أو تؤكِّدَه، ويمكن أيضًا أن تكتشف هذه التجارب بنفسها نوعًا مختلفًا من المادة المظلمة. وسيتفق الجميع على أن المادة المظلمة قد اكتُشِفَتْ، إذا أكدت تجربة واحدة أخرى فقط ما رأته تجربة داما، لكن ذلك لم يحدث بعدُ، ومع ذلك من المفترض أن تتوفَّر إجابات قريبًا في هذا الشأن. حتى إن تقادمت البيانات التي أوضحناها فيما سبق في وقت قراءتك لهذا الكتاب، فطبيعة التجارب لن تتغيَّرَ على الأرجح.

الكشف غير المباشر عن المادة المظلمة

تمثِّل تجارب مصادم الهادرونات الكبير والكواشف المقامة تحت سطح الأرض والتي تعمل بالتبريد أو السوائل النبيلة؛ أسلوبين من أساليب تحديد طبيعة المادة المظلمة. أما الأسلوب الثالث والأخير، فيكون عن طريق «الكشف غير المباشر» للمادة المظلمة في السماء أو على سطح الأرض.

المادة المظلمة خفيفة، لكنها قد تفنى أحيانًا مع نفسها أو مع الجسيم المضاد لها، ولا يحدث ذلك بمعدل كافٍ للتأثير بقوة على الكثافة الكلية، لكنه قد يكون كافيًا لإصدار

إشارةٍ قابلةٍ للقياس؛ وذلك لأنه عند فناء جسيمات المادة المظلمة، تتكون جسيمات جديدة تحمل الطاقة بعيدًا. وفناء المادة المظلمة — حسب طبيعته — يمكن أن يؤدِّي أحيانًا إلى إنتاج الجسيمات والجسيمات المضادة القابلة للكشف عنها التي تنتمي للنموذج القياسي، مثل الإلكترونات والبوزيترونات، أو أزواج من الفوتونات؛ ومن ثَمَّ يمكن للكواشف الفيزيائية الفلكية، التي تقيس الجسيمات المضادة أو الفوتونات، أن ترى علامات تدل على عمليات الإفناء هذه.

جدير بالذكر هنا أن المعدات المستخدمة في البحث عن جسيمات النموذج القياسي الناتجة عن فناء المادة المظلمة لم تُصمَّم خصوصًا لهذا الهدف، وإنما هي تليسكوبات أو كواشف موجودة في الفضاء أو على سطح الأرض، وتهدف للكشف عن الضوء أو الجسيمات لفهم ما يوجد في السماء على نحو أفضل. فمن خلال دراسة الأشياء التي تنبعث من النجوم والمجرات والأجسام الغريبة التي توجد داخلها، يمكن لعلماء الفلك معرفة التركيب الكيميائي للأجرام السماوية واستنتاج خصائص النجوم وطبيعتها.

لذا، فإن الفيلسوف أوجست كونت قد أخطأ عندما قال عن النجوم في عام ١٨٣٥: «لا يمكننا أبدًا بأي وسيلة دراسة التركيب الكيميائي للنجوم.» الأمر الذي ظنَّ ذلك الفيلسوف أنه يتجاوز حدود المعرفة التي يمكن للإنسان بلوغها. لكن بعد فترة ليست ببعيدة من قوله هذه العبارة، عرفنا تركيب الشمس وأثبتنا خطأ أوجست كونت عن طريق اكتشاف أطياف الشمس؛ وهو الضوء الذي تبعثه الشمس أو تمتصه.

وتواصِلُ التجارب اليوم مهمتها بمحاولتها استنتاج تركيب الأجرام السماوية الأخرى، وتتمتع التليسكوبات الآن بدقة عالية، وصرنا نعلم كل بضعة أشهر المزيد من المعلومات عمَّا يوجد في السماء.

ولحسن حظ أبحاث المادة المظلمة، فإن عمليات رصد الضوء والجسيمات التي تهتم بها هذه التجارب الفلكية بالفعل، يمكن أن تنير فكرنا أيضًا بشأن طبيعة المادة المظلمة. فنظرًا لأن الجسيمات المضادة نادرةٌ نسبيًّا في الكون، وتوزيع طاقات الفوتونات يمكن أن يعكس خصائص واضحة وقابلة للتمييز، فإن الكشف عن هذه العناصر قد يرتبط في النهاية بالمادة المظلمة. والتوزيع المكاني أيضًا لهذه الجسيمات قد يساعد في تمييز نواتج الإفناء عن عناصر الخلفية الفيزيائية الفلكية المألوفة.

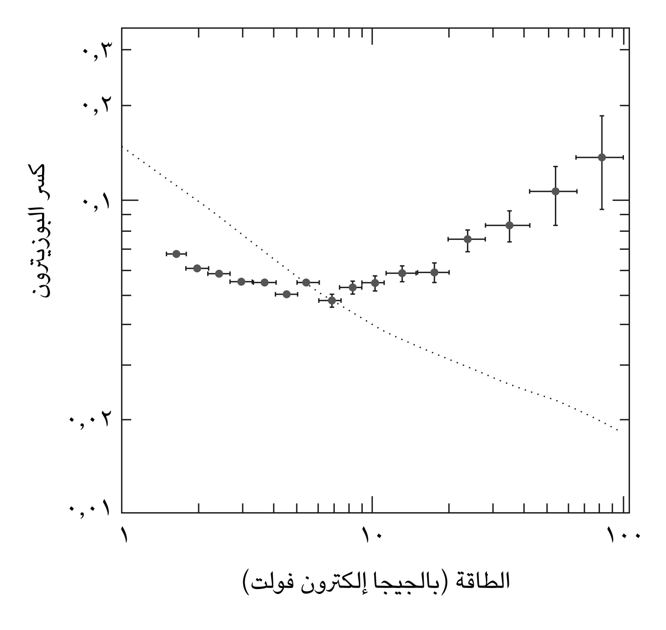
«النظام التجسيمي للطاقة العالية» في ناميبيا، و«نظام مصفوفة التليسكوبات لتصوير الأشعة العالية الطاقة» في ولاية أريزونا، هما مصفوفتان ضخمتان من

التليسكوبات الموجودة على سطح الأرض، وتعملان على البحث عن الفوتونات العالية الطاقة الصادرة عن مركز المجرة. أما الجيل التالي من مراصد أشعة جاما العالية الطاقة، ويتمثَّل في «مصفوفة تليسكوبات تشيرنكوف»، فمن المنتظر أن تكون أكثر دقةً. على الجانب الآخَر، يدور «تليسكوب فيرمي الفضائي لأشعة جاما» في السماء على بُعْد ٥٥٠ كيلومترًا فوق الأرض كل ٩٥ دقيقة على متن قمر صناعي أُطلِق في مطلع عام ٢٠٠٨. تتمتع كواشف الفوتونات الموجودة على سطح الأرض بميزة توفُّر مساحات تجميع شاسعة، أما المعدات الفائقة الدقة الموجودة على قمر فيرمي الصناعي، فتتمتع بقدر أفضل من الدقة فيما يتعلَّق بالطاقة والمعلومات عن الاتجاهات، هذا فضلًا عن سرعة اكتشافها للفوتونات باستخدام مستويات منخفضة من الطاقة، وتمتعها بمجال رؤية يزيد ٢٠٠ مرة عن الأجهزة الموجودة على سطح الأرض.

أيٌّ من هذين النوعين من التجارب يمكن أن يرصد الفوتونات الناتجة عن فناء المادة المظلمة، أو عن الشعاع الصادر عن الإلكترونات والبوزيترونات الناتجة عن فناء هذه المادة، وإذا تحقَّقَ ذلك، فسوف نعرف الكثير عن ماهية المادة المظلمة وخصائصها.

ثمة كواشف أخرى ينصبُّ تركيزها بالأساس على البحث عن البوزيترونات، وهي الجسيمات المضادة للإلكترونات. وقد سجَّلَ الفيزيائيون بتجربة القمر الصناعي «باميلا» ذات القيادة الإيطالية اكتشافاتهم بالفعل، والتي لا تشبه على الإطلاق أيًّا مما تَمَّ التنبؤ به. (انظر الشكل ٢١-٣ للاطِّلَاع على نتائج تجربة «باميلا».) واسم «باميلا» بالإنجليزية PAMELA هو اختصار للحروف الأولى للاسم الطويل للتجربة، وترجمته بالعربية: «تجربة استكشاف المادة والمادة المضادة والفيزياء الفلكية للنوى الخفيفة». وجاء اختصار هذا الاسم الطويل باسم «باميلا» مناسبًا لنطقه باللكنة الإيطالية. لا نعلم إلى الآن ما إذا كانت الأحداث الزائدة بهذه التجربة ناتجةً عن المادة المظلمة، أم إنها أخطاء في تقديرات الأجرام السماوية، مثل النجوم النابضة. لكن في كلتا الحالتين، استحوذت هذه النتائج على اهتمام الفيزيائيين الفلكيين وفيزيائيي الجسيمات على حدٍّ سواء.

يمكن أن تفنى المادة المظلمة أيضًا منتجةً بروتونات وبروتونات مضادة. وهذا، في الواقع، ما تتنبَّأ الكثير من النماذج بحدوثه إذا عثرت جسيمات المادة المظلمة على بعضها البعض بالفعل وتحقَّق الإفناء. لكن الأعداد الكبيرة من البروتونات المضادة المتوارية في المجرة بسبب العمليات الفلكية المعروفة يمكن أن تحجب الإشارات الدالة على المادة المظلمة، ومع ذلك فقد تسنح لنا فرصة رؤية هذه المادة المظلمة عن طريق الديوترونات



شكل ٢١-٣: يوضِّح هذا الشكل البيانات الصادرة عن تجربة «باميلا»، والتي توضِّح مدى عدم التوافق بين بيانات التجارب (المشار إليها بشكل الصليب)، والتنبؤات النظرية (المشار إليها بشكل المنحنى المنقَّط).

المضادة، وهي حالات من الارتباط الضعيف بين بروتون مضاد ونيوترون مضاد، ويمكن أن تتكون أيضًا عند فناء المادة المظلمة. وقد يتوصَّل مطياف ألفا المغناطيسي (إيه إم إس–٠٢) الموجود الآن على محطة الفضاء الدولية، أو تجارب الأقمار الصناعية المتخصصة، مثل مطياف الجسيمات المضادة العام؛ لهذه الديوترونات المضادة، وتُكتشَف المادة المظلمة في النهاية.

وأخيرًا، يمكن للجسيمات غير المشحونة المسماة بالنيوترينوات، التي لا تتفاعل إلا بواسطة القوة الضعيفة، أن تكون هي الحل للاكتشاف غير المباشر للمادة المظلمة. فقد

تُحاصَر المادة المظلمة في مركز الشمس أو الأرض، والإشارة الوحيدة التي يمكن أن تصدر عنها في هذه الحالة ستكون النيوترينوات؛ وذلك لأن هذه النيوترينوات، على عكس الجسيمات الأخرى، لا تتفاعل مع أي جسيمات أخرى؛ ومن ثَمَّ لا يوجد ما يعيقها. وتعمل الكواشف المتمثِّلة في «مصفوفة عدَّاد الميوونات والنيوترينوات بالقطب الجنوبي — آماندا» و«آيس كيوب» و«تليسكوب أنتاريس»، على البحث عن هذه النيوترينوات العالية الطاقة.

وفي حال رصد أيٍّ من الإشارات الموضحة أعلاه — أو حتى في حالة عدم رصدها — سنطَّلِع على المزيد من المعلومات عن طبيعة المادة المظلمة، وتفاعلاتها، وكتلتها. وفي الوقت الحالي، يفكِّر الفيزيائيون في ماهية الإشارة التي يتوقَّعون الحصول عليها وفقًا للتنبؤات المستقاة من العديد من نماذج المادة المظلمة الممكنة، كما أنهم يتساءلون عن القياسات المتوفرة التي يمكن تطبيقها. إن المادة المظلمة مراوغة، بسبب الضعف الشديد لتفاعلها، لكننا نأمل في ظل هذا العدد الكبير من أنواع التجارب المختلفة التي تجري حاليًّا أن نكون قد اقتربنا من اكتشاف هذه المادة. وبإضافة النتائج التي سنتوصَّل إليها من مصادم الهادرونات الكبير وغيره، سوف نحصل على صورة أفضل لما يوجد في الكون وكيفية تجانُس كلِّ أجزائه معًا.

الجزء السادس

كلمة أخيرة

الفصل الثاني والعشرون

التفكير عالميًّا والعمل محليًّا

استعرض هذا الكتاب لمحات حول كيفية تمكُّن العقل البشري من استكشاف الحدود الخارجية للنظام الكوني والبنية الداخلية للمادة، وفي كلا المسعيين، يُعَدُّ الأستاذ الراحل بجامعة هارفرد، سيدني كولمان، أحد أكثر الفيزيائيين سعةً في المعرفة. فيُروَى للطلَّاب دومًا أنه عند تقدُّم سيدني لزمالة ما بعد الدكتوراه عند انتهائه من الدراسات العليا، وصفته جميع خطابات التوصية — فيما عدا واحدًا — بالفيزيائي الأذكى على الإطلاق بخلاف ريتشارد فاينمان. أما الخطاب الوحيد الذي لم يصفه بذلك، فكان الخطاب الصادر من ريتشارد فاينمان نفسه، والذي وصف فيه سيدني بأنه الفيزيائي الأفضل على الإطلاق، وإن لم يأخذ فاينمان نفسه في الاعتبار في هذا التقييم.

وفي احتفال الكتاب التذكاري الذي وُضِع احتفاءً بسيدني — وهو مؤتمر نُظِّم يوم عيد مولده الستين تكريمًا له — تحدَّثَ العديد من كبار الفيزيائيين الذين ينتمون إلى جيله. وأشار هوارد جورجي — فيزيائي الجسيمات المتميِّز الذي كان زميلًا لسيدني في جامعة هارفرد لسنوات طويلة — إلى أن ما أدهشه أثناء متابعته الخطب المتتابعة التي ألقاها أولئك العلماء البارزون في مجال الفيزياء النظرية، هو مدى تباين أساليب تفكيرهم.

كان هوارد محقًّا في ذلك؛ فكل متحدِّث كان له أسلوبه الخاص في تناوُل العلم، وقدَّم إسهامات مهمة باستغلال ما لديه من مهارات مميزة (جدير بالذكر أن جميعهم من الرجال). بعضهم تميَّز بمهارات بصرية، والبعض الآخَر كان موهوبًا من الناحية الرياضية، في حين لم يمتلك البعض سوى قدرة استثنائية على استيعاب المعلومات وتقييمها. واتبع بعض الحضور بالمؤتمر الأسلوب التصاعدي، في حين اتبع البعض الآخَر

الأسلوب التنازلي، وتراوحت إنجازاتهم ما بين فهم القوة النووية القوية في الجزء الداخلي من المادة، والرياضيات التي يمكن استنباطها باستخدام نظرية الأوتار كأداة.

صدق بوشكين حين قال: «إن الهندسة، مثل الشِّعْر، بحاجة إلى الإلهام.» فالإبداع أمر ضروري في فيزياء الجسيمات، وعلم الكونيات، والرياضيات، وغيرها من مجالات العلوم الأخرى، شأنها في ذلك شأن المجالات التي تشتهر باستفادتها من الجانب الإبداعي، مثل الفنون والعلوم الإنسانية. ويعكس العلم صورةً مصغرةً للثراء الإضافي الذي يمكن أن يحسن من المحاولات الإبداعية التي تتم في سياقات مقيَّدة. وما ينطوي عليه العلم من إلهام وخيال يسهل الإغفال عنه في خضم القواعد المنطقية التي يتضمنها. ومع ذلك، فإن اكتشاف الرياضيات والتكنولوجيا وصياغتهما تمَّ على يد أفراد فكَّروا تفكيرًا إبداعيًّا بشأن كيفية تكوين الأفكار، وعلى يد مَن توصَّلوا صدفةً إلى نتائج مثيرة للاهتمام، وكان لديهم من التنبُّه الإبداعي ما مكَّنَهم من معرفة قيمة هذه النتائج.

حالَفَني الحظ على مدار السنوات القليلة الماضية بأن سنحت لي فرص عديدة للالتقاء بأشخاص مبدعين في جميع مناحي الحياة، والعمل معهم. ومن المثير للاهتمام حقًّا التفكير في الجوانب التي يشتركون فيها جميعًا، فقد يبدو العلماء والكتَّاب والفنانون والموسيقيون مختلفين تمامًا من الناحية الظاهرية، لكن طبيعة ما لديهم من مهارات ومواهب وأمزجة ليست متباينة دومًا كما قد يتوقَّع البعض؛ لذا سوف أختم ما استعرضناه معًا في هذا الكتاب من موضوع العلم والتفكير العلمي ببعض الخصائص التي أراها الأكثر إدهاشًا.

موهبة استثنائية

العلماء والفنانون على حدٍّ سواء لا يفكِّرون في الإبداع في حد ذاته عند تنفيذهم شيئًا ما ذا أهمية، وقلة فقط من الناجحين (هذا إن وُجِدوا) يجلسون خلف مكاتبهم ويقرِّرون «أن يكونوا مُبدِعين اليوم»، وإنما ما يحدث هو أنهم يركِّزون على مشكلة ما. وأعني هنا بالتركيز وَضْعَ هدفٍ واحدٍ نصب أعينهم، وعدم التمكُّن من التفكير في أي شيء آخَر سواه، والانكباب عليه.

نشهد عادةً نتائجَ هذه المحاولات الإبداعية دون أن نرى التفاني الهائل والخبرة الفنية التي تقوم عليها هذه المحاولات. عندما شاهدت فيلم «رجل على الحبل»، الذي أُنتِج

عام ٢٠٠٨، وتناوَلَ ما حقَّقَه فيليب بتيت عام ١٩٧٤، عندما سار على الحبل لمسافة ربع ميل في الهواء ما بين برجَيْ مركز التجارة العالمي — الإنجاز الذي لم يأسر اهتمام أغلب سكان مدينة نيويورك مثلي فقط، وإنما أيضًا كثيرين حول العالم — قدَّرتُ ما تمتَّع به فيليب من حسِّ المغامرة واللعب والمهارة، لكن ما فعله فيليب لم يكن مجرد تثبيت حبل مشدود بين حائطين والسير عليه، وإنما أطلعتني مصمِّمة الرقصات إليزابيث ستريب على كتاب سميكٍ مليء بالرسومات والحسابات التي أجراها فيليب قبل تثبيته أحد الحبال في ورشة عملها، حينها فقط أدركتُ قدر الإعداد والتركيز الذي ضمن لفيليب التوازن في عمله. كان فيليب «مهندسًا علَّمَ نفسه بنفسه»، مثلما كان يصف نفسه دومًا مازحًا، ولم يستعدَّ للسير على الحبل المشدود إلا بعدما أجرى دراسة وتطبيقًا متأنيًّا لقوانين الفيزياء من أجل فهم الخصائص الميكانيكية للمواد التي كان يستخدمها. ولا ريب أنه إلى أن نفَّذَ العمل بالفعل، لم يكن موقنًا تمامًا من أنه قد وضع كل شيء في الحسبان، فهو لم يضع سوى كل ما تمكَّنَ هو من توقُّعه فحسب، وهو ما كان — على نحوٍ لا يثير دهشتنا في شيء — كافيًا.

إذا كنتَ تجد صعوبة في تصديق هذا النوع من الانهماك، فعليك بالنظر حولك؛ إن الناس يُفتَنون عادةً بما يمارسونه من أنشطة، سواء أكانت بسيطة أم عظيمة الشأن. لعلك لاحظت جارك منشغلًا بحل ألغاز الكلمات المتقاطعة، أو أصدقاءك وهم متسمرون أمام المباريات الرياضية التي يعرضها التليفزيون، أو فتاة منهمكة للغاية في القراءة في مترو الأنفاق مما يجعلها تغفل عن المحطة التي من المُفترَض أن تنزل فيها، ناهيك عن الساعات التي لا تُحصَى التي يمكن أن تقضيها أنت نفسك في ممارسة ألعاب الفيديو.

إن المنهمكين في الأعمال البحثية محظوظون؛ لأن ما يفعلونه لجَنْي رزقهم يتوافَق مع ما يحبونه، أو على الأقل ما لا يمكنهم تجاهُله. والمهنيون المحترفون من هذه الفئة لديهم فكرة تبعث على الراحة بوجه عام (وإن كانت من المحتمل أن تكون وهمية)، وهي أن ما يفعلونه قد يكون ذا أهمية دائمة. فيحب العلماء التفكير في أنهم يؤدون رسالةً ساميةً يسعون من خلالها لتحديد الحقائق بشأن العالم. قد لا يسمح لهم الوقت بحل ألغاز الكلمات المتقاطعة، لكنهم يفضِّلون قضاءَ المزيد من الوقت بلا شك في العمل على المشروعات البحثية، لا سيما تلك المتعلقة بصورة أشمل وهدف أسمى، وأداء هذا العمل قد ينطوي على القدر نفسه من الانهماك الذي تنطوي عليه ممارسة لعبة ما أو حتى مشاهدة المباريات الرياضية على شاشة التليفزيون.[1] لكن العالِم يستمر عادةً في التفكير

في البحث الذي يجريه أثناء قيادته السيارة أو نومه ليلًا، والقدرة على الالتزام بمشروع ما لأيام أو شهور أو أعوام يرتبط بلا شك بالإيمان بأن هذا البحث مهم، حتى إن لم يفهمه سوى قلة قليلة (على الأقل في البداية)، وحتى إن أثبتَ المسارُ خطأَ هذا المشروع في النهاية.

على الجانب الآخَر، صار من الشائع مؤخرًا التشكيك في الموهبة والإبداع الفطري، وعزو ما يحقِّقه المرء من نجاح إلى الممارسة والتعامل المبكر مع الموضوع فحسب. وفي أحد الأعمدة بصحيفة «نيويورك تايمز»، لخَّصَ ديفيد بروكس بعض الكتب التي صدرت مؤخرًا عن هذا الموضوع قائلًا: «إننا نعتقد الآن أن ما تمتَّعَ به موتسارت هو نفس ما تمتَّعَ به تايجر وودز بالضبط؛ أَلَا وهو القدرة على التركيز لفترات زمنية طويلة، وعزم والده على تحسين مهاراته.»[2] ضرب بروكس مثالًا آخَر ببيكاسو؛ كان بيكاسو ابنًا لفنان كلاسيكي، وفي تلك البيئة المتميزة رسم لوحاته الرائعة عندما كان طفلًا. تمتَّعَ بيل جيتس أيضًا بفرص استثنائية، وفي كتاب مالكوم جلادويل «المتميِّزون»[3] الذي صدر مؤخرًا، يذكر المؤلِّف أن المدرسة الثانوية التي التحَقَ بها بيل جيتس في سياتل كانت واحدةً من المدارس القليلة التي تحتوي على نادٍ للكمبيوتر. وفيما بعدُ، سنحت الفرصة لبيل جيتس لاستخدام أجهزة الكمبيوتر في جامعة واشنطن لساعات متواصلة، وأشار جلادويل إلى أن الفرص التي أُتيحَت لجيتس لعبت دورًا أهم في نجاحه مقارَنةً بما كان لديه من دافع وموهبة.

لا ريب أن التركيز والممارسة في مرحلة مبكرة من العمر على نحو يسمح بترسيخ الأساليب والتقنيات في العقل يُعَدَّان جزءًا لا يتجزَّأ من العديد من الخلفيات الإبداعية. فعندما تبغي حلَّ مشكلةٍ ما، لن ترغب في قضاء وقت طويل في التعامل مع الأساسيات، وعندما تصبح المهارات (أو الرياضيات أو المعرفة) أمرًا اعتياديًّا لك، يمكنك استدعاؤها على نحو أيسر عندما تحتاج إليها. وتستمر هذه المهارات المتأصِّلة غالبًا في اللاوعي لديك، حتى قبل أن تدفع بالأفكار إلى عقلك الواعي، وكم من شخص توصَّلَ إلى حلٍّ لمشكلة ما أثناء نومه. على سبيل المثال، أخبرني لاري بيدج أن فكرة محرك جوجل واتته في الحلم، لكن ذلك لم يحدث إلا بعد أن أعياه التفكير في تلك المشكلة شهورًا طوالًا. ويعزو الناس غالبًا الأفكار المتبصرة إلى «الحدس» دون وعي منهم بالقدر المستغرَّق من الوقت في الدراسات المُفصَّلة التي سبقت لحظة الاكتشاف.

ومن ثَمَّ، فإن بروكس وجلادويل محقَّان بما لا يدع مجالًا للشك في بعض الجوانب. فرغم أن المهارة والموهبة أمران مهمَّان، فإنهما لن يصِلَا بك إلى الكثير دون شحذ هذه

المهارات والطاقة، الأمر الذي يتحقَّق مع التكريس والممارسة. لكن الأمر لا يقتصر هنا على الفرص التي تسنح للمرء في سن مبكرة أو الإعداد المنهج فحسب، فهذا المنظور يغفل عن حقيقة أن القدرة على التركيز والممارسة بهذا القدر من الانكباب يُعَدُّ مهارةً في حدِّ ذاته. والأشخاص الاستثنائيون، الذين يتعلمون من تجاربهم السابقة ويمكنهم تذكُّر الدروس المتراكمة في عقولهم، يزيد احتمال استفادتهم من الدراسة والتكرار. هذا الإصرار من شأنه السماح بالتركيز الذي يحقِّق النتائج المرجوة في النهاية، سواء أكان ذلك في مجال الأبحاث العلمية أم في أي مسعًى إبداعي آخَر.

من المنطلق ذاته، نجد أن اسم عطر كالفين كلاين الأصلي Obsession (يعني بالعربية «هوس») لم يتم اختياره بمحض الصدفة؛ فسِرُّ نجاح كلاين (حسبما يقول) هو أنه كان مهووسًا بما يفعل. من ناحية أخرى، على الرغم من أن محترفي الجولف يتقنون ضرباتهم لعدد من المرات لا حصرَ لها، فإنني لا أعتقد أن جميعهم يمكنهم ضرب كرة آلاف المرات دون أن يُصابوا بالملل أو الإحباط الشديد. أيضًا صديقي في التسلُّق، كاي زين، الذي يسلك طرقًا صعبة دائمًا — تبلغ درجة خطورتها ٥,١٣ لَمن يعرفون اللعبة — يتذكر التفاصيل والحركات على نحو أفضل مني، وعندما يسلك طريقًا ما عشر مرات، يستفيد أكثر، وذلك بدوره يدفعه لمزيد من المثابرة. أما أنا، فيصيبني ذلك بالملل. سأواصِل التسلق، لكنني سأظل متوسطة المستوى، أما كاي، الذي يعرف كيف يتعلم من التكرار، فسيواصل تحسُّنه باستمرار. نجد كذلك جورج لوي لوكلير، المؤلف وعالِم الطبيعة والرياضيات الذي عاش في القرن الثامن عشر، يلخِّص قدراته في عبارة واحدة: «ليست العبقرية سوى قدرة أكبر على الصبر.» وإن كنتُ لأضيف على هذه العبارة أن العبقرية تكمن أيضًا في «عدم الصبر على عدم التحسُّن».

تسلُّق «جبل الحبوب»

يلعب كلٌّ من الممارسة، والتدريب الفني، والحافز دورًا محوريًّا في البحث العلمي، لكن هذه العناصر ليست كافيةً وحدها. فمرضى التوحُّد — ناهيك عن بعض الأكاديميين وأغلب البيروقراطيين — يُظهِرون مهارات فنية عالية المستوى، لكنهم يفتقرون مع ذلك إلى الإبداع والخيال، وما عليك سوى مشاهدة الأفلام السينمائية التي تُنتَج حاليًّا لترى إلى أي مدًى وصلت محدودية الحافز والإنجازات الفنية في غياب الإبداع والخيال. فالمَشاهد التي تُقاتِل فيها رسومٌ متحركة رسومًا متحركة أخرى في تسلسُلٍ للأحداث يصعب

متابعته؛ قد تكون إنجازًا مُبهِرًا في حدِّ ذاتها، لكنها نادرًا ما تتضمن أي نوع من الطاقة الإبداعية اللازمة لأسر انتباه الكثيرين منَّا. فبالرغم من الإضاءة والأصوات الصاخبة التي تصاحِب هذه النوعية من الأفلام، كثيرًا ما يغلبني النوم أثناء مشاهدتها.

إن أكثر الأفلام قدرةً على استحواذِ انتباهي هي تلك التي تتناوَلُ أفكارًا حقيقية وأسئلة مهمة، لكنها تجسِّدها في نماذج بسيطة يمكننا تقديرها واستيعابها. على سبيل المثال، تدور أحداث فيلم «كازابلانكا» حول الوطنية والحب والحرب والولاء، لكن بالرغم من تحذير ريك لإيلسا في أحداث الفيلم من أنه «من اليسير إدراك أن مشكلات ثلاثة أفراد فقط لا تتعدى كونها جبلًا من الحبوب في هذا العالم المجنون»، فهؤلاء الأشخاص الثلاثة هم سبب عشقي لهذا الفيلم (بالإضافة، بالطبع، إلى الممثلين بيتر لوري وكلود رينز).

في العلم أيضًا، تنشأ الأسئلة الصائبة عادةً من الأخذ في الاعتبار الإطارين الأكبر والأصغر على حدٍّ سواء، فثمة أسئلة مهمة نرغب جميعًا في الإجابة عنها، وأخرى صغيرة نؤمن بأنه يمكن حلها. وتحديد الأسئلة المهمة لا يكون كافيًا عادةً، وذلك لأن التوصُّل إلى حلول للأسئلة الصغيرة هو الذي يؤدِّي عادةً إلى التقدُّم، فما من شك أن حبة الرمل يمكن أن تكشف عالمًا بالكامل، وهذا ما يذكرنا به عنوان المؤتمر الذي عُقِد في مدينة سولت ليك سيتي وتناول موضوع النطاق (المشار إليه في الفصل الثالث من هذا الكتاب)، وبيت الشعر المستوحى منه ذلك المصطلح للشاعر ويليام بليك، وقد أدرك جاليليو ذلك أيضًا منذ زمن بعيد.

لذا، من المهارات التي لا غنى عنها لدى أي شخص مبدعٍ القدرةُ على طرح الأسئلة الصائبة. فيحدِّد المبدعون دومًا طرقًا واعدة ومشوقة ومهمة يمكن خوضها لتحقيق التقدم، وفي النهاية يصيغون الأسئلة على نحو صحيح. وأفضل الممارسات العلمية على الإطلاق هي التي تجمع عادةً بين الوعي بالمشكلات الشاملة المهمة والتركيز على إحدى المشكلات أو التفاصيل الصغيرة الواضحة التي يسعى شخص ما سعيًا حثيثًا لحلها أو استيعابها. وفي بعض الأحيان، تكون هذه التباينات أو المشكلات الصغيرة المفتاحَ لتحقيق صور تقدُّم هائلة.

يرجع الفضل جزئيًّا أيضًا في أفكار داروين الثورية إلى الملاحظات الدقيقة التي كان يجريها للطيور والنباتات. أيضًا لم يكن الحضيض الشمسي لكوكب عطارد قياسًا خاطئًا، وإنما هو إشارة إلى أن قوانين نيوتن الفيزيائية كانت محدودة، وقد أصبح هذا القياس بعد ذلك أحد الأدلة على صحة نظرية الجاذبية لأينشتاين. إن صور الخلل

والتباين، التي قد تبدو بسيطة للغاية أو غامضة في نظر البعض، يمكن أن تفتح الباب لأفكار ومفاهيم جديدة لَمَن ينظرون إلى المشكلة بالطريقة الصحيحة.

من جانب آخَر، لم يبدأ أينشتاين عمله بهدف فهم الجاذبية، وإنما كان يحاول استيعاب آثار نظرية الكهرومغناطيسية التي لم يمر على وضعها طويلًا آنذاك، فركَّزَ على الجوانب الغريبة أو غير المُتَّسِقة المتعلقة بما رآه الجميع من تناظرات للزمان والمكان، وانتهى به الأمر مُحدِثًا ثورةً في تفكيرنا جميعًا. لقد آمَن أينشتاين بأنه لا بد من وجود معنى وراء كل ذلك، وتمتَّعَ باتساع نطاق رؤيته ومثابرته حتى تمكَّنَ من استنتاج كيف يمكن أن يكون ذلك ممكنًا.

يوضِّح المزيد من الأبحاث الحديثة هذا التداخل أيضًا، فإدراك السبب وراء عدم إمكانية حدوث تفاعلات معينة في نظريات التناظر الفائق قد يبدو تفصيلًا لا لزوم له في نظر البعض، وقد سُخِر من زميلي ديفيد كابلان عندما تحدَّثَ عن مثل هذه المشكلات في أوروبا في الثمانينيات، غير أنه ثبت بعد ذلك أن هذه المشكلة مصدر ثري لمعلومات دقيقة جديدة فيما يتعلَّق بالتناظر الفائق وانتهاك هذا التناظر؛ ما أدَّى إلى ظهور أفكارٍ جديدة يتأهَّب الفيزيائيون التجريبيون الآن في مصادم الهادرونات الكبير لاختبارها.

إن لديَّ إيمانًا راسخًا بأن الكون مُتَّسِق، وأي انحراف فيه يشير إلى شيء ما مثير للاهتمام لم يُكشَف عنه الستار بعدُ. وعندما أوضحتُ هذه النقطة في أحد العروض التقديمية في «مؤسسة الإبداع» بواشنطن العاصمة، فسَّرَ أحد المدونين ما قلتُه تفسيرًا لطيفًا؛ وهو أنني أتمتع بمعايير مهنية عالية، لكن في الحقيقة الإيمان باتساق الكون هو على الأرجح القوةُ الدافعة الرئيسية للعديد من العلماء في محاولتهم حلَّ الأسئلة التي سيتناولونها بالدراسة.

يتمتع الكثير من المبدعين الذين أعرفهم أيضًا بالقدرة على استيعاب عدد من الأسئلة والأفكار في عقولهم في نفس الوقت. أي شخص يمكنه البحث عن أي موضوع على محرك جوجل، لكنك إن لم تتمكَّن من ربط الحقائق والأفكار التي تتوصَّل إليها معًا بطرق مثيرة للاهتمام، فلن تتوصَّل إلى أي شيء جديد على الأرجح. وهذا التقارب بين الأفكار المتعارضة المختلفة المصادر هو ما يؤدِّي عادةً إلى علاقات أو مدارك أو أشعار جديدة (الأمور التي انطبق عليها مصطلح الإبداع في الأساس).

يفضِّل الكثيرون العمل على نحو تتابُعيٍّ، لكنهم بذلك إذا واجهتهم أي عقبات أو اكتشفوا أن الطريق الذي يسلكونه غير مؤكد، فستكون هذه نهاية مسعاهم. لكن

العلماء — شأنهم شأن الكثير من الكتَّاب والفنانين — يحرزون التقدُّمَ على دفعات، ولا يكون ذلك عملية تتابعية دومًا؛ فقد يفهمون بعض أجزاء اللغز الذي يدرسونه، لكنهم يطرحون الأجزاءَ الأخرى التي لا يفهمونها جانبًا لبعض الوقت، آملين في ملء هذه الثغرات فيما بعدُ. قلة فقط هم مَن يفهمون كلَّ شيء متعلق بنظرية ما عن طريق قراءة واحدة متواصلة. فعلينا أن نؤمن بأننا سنربط جميع أجزاء اللغز معًا في النهاية لنتمكَّن من تجاوُز شيءٍ ما، ثم العودة إليه لاحقًا بعد أن نتسلَّح بقدر أكبر من المعرفة أو سياق أكثر شمولًا. قد تبدو الأبحاث أو النتائج في البداية غير مفهومة، لكننا نواصِل قراءتها على أي حال، وعندما نعثر على شيء ما لا يمكننا فهمه، نتجاوزه، ونصل إلى النهاية لحل اللغز بطريقتنا، ثم نعود إلى الجزء الذي لم نفهمه بعد ذلك. وعلينا الاستغراق جيدًا في الأمر لنستمر فيه، وذلك من خلال تحديد ما هو منطقي وما هو غير منطقيٍّ.

من العبارات الشهيرة لتوماس إديسون: «العبقرية واحد في المائة منها إلهام، وتسعة وتسعون في المائة منها عرق وجهد.» قال لوي باستير أيضًا ذات مرة: «في المجالات التي تعتمد على الملاحظة، تأتي الفرصة للعقول المتأهبة لها.» ومن ثَمَّ، فإن العلماء المتفانين في عملهم يتوصَّلون أحيانًا إلى الإجابات التي يبحثون عنها، لكنهم قد يتوصَّلون كذلك إلى حلولٍ لمشكلات غير تلك التي استهدفوها في البداية من أبحاثهم. على سبيل المثال، لم يكن ألكسندر فليمنج يقصد التوصُّل إلى علاجٍ للأمراض المعدية، وإنما ما حدث هو أنه لاحَظَ أن فطرًا ما قد دمَّرَ مستعمرات من المكورات العنقودية التي كان يدرسها، وأدرك من ثَمَّ المزايا العلاجية المحتملة لهذا الفطر، وإنْ تطلَّبَ الأمر عقدًا من الزمان وجهودَ أشخاصٍ آخرين قبل أن يتطوَّرَ البنسلين ليُصبِح أحد أهم العقاقير التي غيَّرَت وجه العالم.

تنشأ المزايا الثانوية غالبًا من المخزون الكبير للأسئلة، فعندما عملتُ مع رامان ساندرم على موضوع التناظر الفائق، انتهى بنا الأمر إلى اكتشاف بُعْدٍ إضافيٍّ ملتوٍ من شأنه حلُّ مشكلةِ التسلسل الهرمي. بعد ذلك، عندما دقَّقْنا النظرَ في المعادلات ووضعناها في سياق أكثر اتساعًا، توصَّلْنا أيضًا إلى أن الفضاء يمكن أن يحتوي على بُعْدٍ ملتوٍ لا نهائيٍّ دون أن يتعارَضَ ذلك مع أيٍّ من الملاحظات المعروفة أو قوانين الفيزياء. كان ما ندرسه هو فيزياء الجسيمات، وهو موضوع مختلف كليةً، لكننا أخذنا في الاعتبار النطاقين الشامل والمحدود في نفس الوقت. وكنَّا على وعي بالأسئلة المهمة المتعلقة بطبيعة

الفضاء، حتى عندما كنَّا نركِّز على الموضوعات الأكثر ارتباطًا بدراسة الظواهر، مثل فَهْم التسلسل الهرمي لنطاقات الكتلة في النموذج القياسي.

من السمات الأخرى المهمة أيضًا لهذا العمل هو أنني ورامان لم نكن خبيرين في النسبية؛ ولذلك تناولنا بحثنا بعقول متفتحة، ولم نتوقَّع (وكذلك لم يفعل أيُّ أحدٍ آخَر) أن نظرية الجاذبية لأينشتاين تسمح بوجود بُعْدٍ غير محدود وغير مرئي إلى أن أثبتَتْ لنا المعادلات إمكانيةَ ذلك، وثابرنا في متابعة نتائج المعادلات دون وعي منَّا بأن وجود بُعْدٍ إضافيٍّ غير محدود من المفترض أن يكون مستحيلًا.

رغم ذلك، لم نقتنع على الفور بأننا على صواب، ولم ننغمس في فكرة الأبعاد الإضافية الثورية بتهوُّر، وإنما لم نتجاوز فكرة الزمكان إلا بعدَ ما أجريناه وأجراه غيرنا من محاولاتٍ لتوظيف المزيد من الأفكار المتعارَف عليها. وبالرغم من أن وجود بُعْدٍ إضافي يُعَدُّ اقتراحًا جديدًا وغريبًا، فإن نظرية النسبية لأينشتاين تنطبق عليه؛ ومن ثَمَّ توفَّرَتْ لدينا المعادلات والأساليب الرياضية اللازمة لفهم ما قد يحدث في الكون الافتراضي الذي تصوَّرْناه.

استخدم الناس بعد ذلك نتائج هذا البحث، متخذين الأبعاد الإضافية نقطةَ انطلاقٍ لاكتشاف الأفكار الفيزيائية الجديدة التي قد تنطبق على كون لا ينطوي على أيٍّ من هذه الأبعاد على الإطلاق. وبالتفكير في المسألة على نحو مستقل، أدرَكَ الفيزيائيون الإمكاناتِ التي لم يكونوا على وعي بها على الإطلاق في السابق، وساعَدَ ذلك في التفكير خارج صندوق الفضاء الثلاثي الأبعاد.

ما من سبيل أمام أي شخص يتناوَل موضوعًا جديدًا سوى أن يحيا مع عدم اليقين الذي يسبق حل أي مشكلة حلًّا نهائيًّا. فحتى عند البدء من أساس معرفي سليم، يواجِه أي شخص يدرس ظاهرةً جديدة عددًا من الأمور الغامضة والشكوك التي تصاحبها، وإن كانت أقل خطورةً بالطبع على الحياة من السير على حبل معلَّق في الهواء. فيحاول مغامِرو الفضاء — بل الفنانون والعلماء أيضًا — «الخوض بجرأة فيما لم يَخُضْه أي شخص آخَر من قبلُ.» لكن هذه الجرأة ليست عشوائية أو اعتباطية، ولا تغفل عن الإنجازات السابقة، حتى عندما يتضمن المجال الجديد أفكارًا جديدة، أو يتنبَّأ بتجارب تبدو جنونيةً وغير واقعيةٍ للوهلة الأولى. يبذل الباحثون أقصى ما في وسعهم ليكونوا متأهِّبين، وهنا تأتي فائدة القواعد والمعادلات والغرائز الفطرية؛ فهذه العناصر هي التي توفِّر لنا الحماية عند خوضنا مجالات بحثية جديدة.

يقول زميلي مارك كاميونكواسكي: «من الجيد أن تكون طَموحًا وذا رؤية مستقبلية.» لكن يظل عليك تحديد أهداف واقعية. وقد أشار أحد الحضور في المؤتمر الذي حضرته في «مؤسسة الإبداع» — وهو طالب في مجال إدارة الأعمال وحاصل على جائزة — إلى أن النمو الاقتصادي الناجح الذي تطوَّرَ مؤخرًا إلى فقاعة اقتصادية بدأ في صورة إبداع. لكنه أوضح في الوقت نفسه أن نقص القيود تسبَّبَ في انفجار هذه الفقاعة.

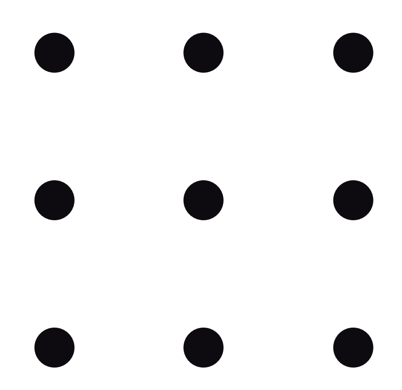
بعض أهم الأبحاث الثورية التي شهدناها في الماضي تعرض نموذجًا لنزعتَيِ الثقة والحذر المتناقضتين، وقد قال لي الكاتب العلمي، جاري تابس، ذات مرة إن الأكاديميين أكثر مَن عرفهم ثقةً وتشكُّكًا في الوقت نفسه، وهذا التناقض هو الدافع لدى هؤلاء الأكاديميين في عملهم، فهم يؤمنون بأنهم يحرزون تقدُّمًا مصحوبًا بمعايير قوية لضمان صحة ما يفعلونه. والمبدعون عليهم الإيمان بأنهم يحتلون مكانةً متميزةً تسمح لهم بتقديم الإسهامات، لكن مع الوضع في الاعتبار دومًا الأسبابَ العديدة التي قد يكون الآخرون قد فكَّروا فيها وتجاوُزَهم عن مثل هذه الأفكار.

والعلماء الذين يتسمون بالإقدام الشديد في أفكارهم يكونون عادةً في غاية الحذر عند عرض هذه الأفكار. فنجد أن اثنين من أكثر العلماء تأثيرًا على البشرية، وهما إسحاق نيوتن وتشارلز داروين، قد انتظرا بعض الوقت قبل أن يُعلِنَا عن أفكارِهما العظيمة. استمر بحث داروين سنوات عديدة، لكنه لم ينشر كتابه «أصل الأنواع» إلا بعد أن أتَمَّ ما كان يُجرِيه من بحث مكثَّفٍ قائمٍ على الملاحظة. وقدَّمَ كتاب نيوتن «المبادئ الرياضية للفلسفة الطبيعية» كذلك نظرية الجاذبية التي عمل على تطويرها عقدًا كاملًا من الزمان، لكنه لم ينشرها إلى أن توصَّلَ إلى دليل مُرضٍ يُثبِت أن الأجسام ذات البُعْد المكاني الاعتباطي (وليس الأجسام التي تُشبِه النقاط فقط) تخضع لقانون التربيع العكسي، وإثبات هذا القانون — الذي ينصُّ على أن الجاذبية تتناسَب عكسيًّا مع مربع المسافة من منتصف الجسم — جعل نيوتن يطوِّر حسابَ التفاضل والتكامل.

يتطلَّب الأمر أحيانًا صياغةً جديدةً للمشكلة من أجل رؤيتها على نحو صحيح، وإعادة تعريف الحدود التي تُمكِّننا من الوصول إلى الحل حيث لا يبدو ذلك ممكنًا ظاهريًّا. ويلعب الإيمان والمثابرة غالبًا دورًا فارقًا في النتائج، لكن ليس المقصود هنا الإيمان الديني، وإنما الإيمان بوجود الحل، فالعلماء الناجحون — بل المبدعون بوجه عام — لا يقبلون بالطرق المسدودة. وإن لم يكن بإمكانهم حلُّ المشكلة بطريقة معينة، يسلكون طريقًا آخَر، وإذا واجَهوا عقبةً في ذلك الطريق، يحفرون نفقًا، أو يبحثون عن

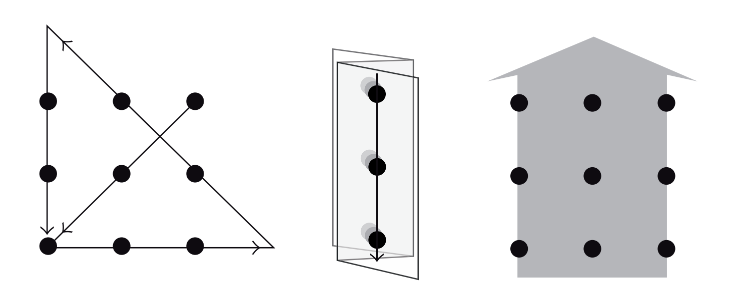
اتجاه آخَر، أو يطيرون فوق الطريق ويرصدونه من علٍ لاستكمال مسيرتهم، وهنا يأتي دور الخيال والأفكار التي تبدو جنونية. يجب أن نؤمن بوجود الحل لكي نتمكَّنَ من المواصلة، كما يجب أن نثقَ في أن العالم ينطوي على منطق داخلي مُتَّسِق سنكتشفه في النهاية. وإذا فكَّرنا في شيء ما من المنظور السليم، فسيُمكننا غالبًا التوصُّل إلى الروابط التي نغفلها عادةً.

إن مصطلح «التفكير خارج الصندوق» لا يعني الخروج من الحجيرة المخصَّصة لك في مكان عملك (كما كنتُ أظن في البداية)، وإنما هو مُستمَدٌّ من لغز النقاط التسع الذي يطلب منك توصيل تسع نقاط باستخدام أربعة خطوط ودون رفع القلم عن الورقة (انظر الشكل ٢٢-١). ما من حلٍّ على الإطلاق لهذا اللغز إذا حصرت حركات قلمك داخل شكل المربع، لكن الفكرة هنا هي أن ذلك ليس من شروط حل اللغز، ومن شأن «الخروج من الصندوق» أن يوصلك إلى الحل (انظر الشكل ٢٢-٢). عندما تفعل ذلك، ستدرك أنه بإمكانك إعادة صياغة المسألة بعدد من الطرق الأخرى أيضًا. على سبيل المثال، إذا استخدمت نقاطًا سميكة، فسيمكنك استخدام ثلاثة خطوط فقط للربط بينها، وإذا طويت الورقة (أو استخدمت خطًّا سميكًا، وهو الاقتراح الذي قدَّمَتْه فتاة شابة لمبتكر اللغز)، فسيمكنك توصيل النقاط بخط واحد فقط.



شكل ٢٢-١: تقوم فكرة لغز النقاط التسع على توصيل جميع النقاط ببعضها باستخدام أربعة خطوط فقط، ودون رفع القلم عن الورقة.

هذه الحلول ليست غشًّا، ولن تكون كذلك إلا إذا فرض اللغز قيودًا أخرى لحله. والتعليم أحيانًا، للأسف، لا يشجع الطلَّاب على «تعلُّم» كيفية حل المشكلات فحسب، وإنما أيضًا يشجِّعهم على تخمين ما يقصده المعلم، فيضيِّق بذلك من نطاق الإجابات الصحيحة، بل من أفق تفكير الطلاب أيضًا. في كتابه «الكوارك والجاجوار»،[4] اقتبس موري جيلمان «قصة البارومتر»[5] عن ألكسندر كالاندرا، أستاذ الفيزياء بجامعة واشنطن، التي يروي فيها حيرةَ أحد المعلمين بشأن منح أحد الطلاب تقديرًا أم لا. سأل ذلك المعلم طلَّابه كيف يمكنهم استخدام البارومتر لتحديد طول مبنى ما، فأجاب ذلك الطالب بأنه يمكن ربط حبل بالبارومتر، ثم إنزاله إلى الأرض، ومعرفة طول الحبل بعد ذلك. وعندما طلب منه المعلم استخدام قواعد الفيزياء في الحل، اقترَحَ الطالب إلقاء البارومتر من أعلى المبنى وقياس الوقت الذي استغرقه في السقوط، أو قياس الظل في أي وقت معلوم من اليوم. تطوَّعَ الطالب أيضًا بطرح حلٍّ بعيد عن الفيزياء، وهو أن يعرض على حارس المبنى الحصول على البارومتر مقابل أن يُطلِعه على طول المبنى. لعل كل هذه الإجابات ليست ما كان يبحث عنه المعلم، لكن الطالب بذكاء — وروح فكاهة — أدرك أن المعلم لم يفرض قيودًا على حل المشكلة.



شكل ٢٢-٢: تشمل الحلول الإبداعية الممكنة لِلُغز النقاط التسع «التفكير خارج الصندوق»، وطي الورقة بما يسمح بتوازي النقاط، واستخدام قلم خطه سميك للغاية.

عندما بدأتُ، برفقة فيزيائيين آخَرين، التفكيرَ في أبعاد الفضاء الإضافية في التسعينيات، لم نخرج من الصندوق فحسب، وإنما خرجنا أيضًا من الفضاء الثلاثي

الأبعاد، ففكَّرْنا في عالَمٍ يكون فيه النطاق الذي حللنا في إطاره المشكلات من قبلُ أكبرَ مما افترضنا في البداية، وعند فعل ذلك، توصَّلْنا إلى حلول ممكنة للمشكلات التي طالما أرقت فيزيائيي الجسيمات على مدى سنوات طوال.

ومع ذلك، فإن الأبحاث لا تنشأ من العدم، وإنما تثريها الأفكار والمدارك العديدة التي توصَّلَ إليها آخَرون من قبلُ. والعلماء الناجحون هم الذين ينصتون لبعضهم، فأحيانًا نجد المشكلة أو الحل السليم بمجرد الإنصات لعمل شخص آخَر أو ملاحظة هذا العمل أو قراءته بعناية. ونتعاوَن غالبًا للجمع بين مواهب أشخاص مختلفين، ولتحرِّي الصدق والأمانة.

حتى إنْ أرادَ كل شخص أن يكون أول مَن يتوصَّل إلى حلِّ مشكلةٍ ما مهمة، تظل حقيقة أن العلماء يتعلَّمون بعضهم من بعض، ويُطلِع كلٌّ منهم الآخَرَ على ما لديه من معلومات حول الموضوعات المشتركة. ففي بعض الأحيان، يقول العلماء الآخَرون أشياءَ تتضمن أدلةً لمشكلات أو حلولًا مثيرةً للاهتمام، حتى دون أن يدركوا ذلك. وقد يتمتع العلماء بإلهامهم الخاص، لكنهم في الوقت نفسه يتبادلون الأفكار، ويحاولون التوصُّل إلى النتائج، وإجراء التعديلات أو البدء من جديد إذا أثبتَتِ الأفكارُ الأصلية عدم صحتها. وتخيُّلُ أفكارٍ جديدة والحفاظ على بعضها، مع التخلُّص من أفكارٍ أخرى، هو الطريقة التي نكسب بها نحن معشر العلماء عيشنا؛ فبذلك نحقِّق التقدُّم. ليس هذا بالأمر السيئ، بل هذا هو التقدم.

من ثَمَّ، فإن من أهم الأدوار التي يمكنني لعبها كمستشارة لطلَّاب الدراسات العليا هو الانتباه لما لديهم من أفكارٍ جيدة — حتى إن لم يكونوا قد عرفوا بعدُ كيف يعبِّرون عنها — والإنصات لهم عندما يتوصَّلون إلى ثغرات فيما أقدِّمه من اقتراحات. ولعل هذه المناقشات هي أحد أفضل سُبُل التعلُّم، أو تعزِّز على الأقل من الإبداع لدى الأفراد.

تلعب المنافسة كذلك دورًا مهمًّا، سواء في العلوم أو في معظم صور الإبداع الأخرى. في إحدى المناقشات حول الإبداع، قال لنا الفنان جيف كونز إنه عندما كان صغيرًا، كانت شقيقته تمارِس الفنون، حينذاك أدرك أنه يمكن أن يتفوَّقَ عليها. أوضح لنا، كذلك، منتج أفلام شاب كيف أن المنافسة شجَّعَتْه وشجَّعَتْ زملاءه على استيعاب التقنيات والأفكار التي يتبعها كلٌّ منهم؛ ومن ثَمَّ تحسين وتطوير أفكارهم وتقنياتهم الخاصة. عبَّر أيضًا الطاهي ديفيد تشانج عن فكرة مماثلة على نحو أكثر صراحةً؛ فعندما ذهب

إلى أحد المطاعم الجديدة، علَّقَ على الطعام قائلًا: «كم هذا لذيذ! لماذا لم أفكِّر فيه من قبلُ؟»

نيوتن أيضًا لم ينشر ما توصَّلَ إليه من نتائج إلا بعد اكتمالها، لكنه كان قلقًا على الأرجح أيضًا من منافسه روبرت هوك الذي كان يعرف قانونَ التربيع العكسي أيضًا، لكنه لم يعرف حساب التفاضل والتكامل اللازم لدعم الفكرة. ومع ذلك، يبدو أنه من بين الأسباب التي دفعَتْ نيوتن لنشر أفكاره هو توصُّلُه إلى أن هوك كان يجري بحثًا ذا صلة ببحثه. أيضًا ما دفَعَ داروين لنشر نتائجه هو معرفته بأن ألفريد راسل والاس كان يعمل على الأفكار الثورية ذاتها، وكان سيسرق منه الضوء لو ظلَّ صامتًا فترةً أطول. أراد داروين ونيوتن أن تكون أفكارهما صائبةً قبل أن يُعلِنَا عن نتائجهما الثورية، وظلَّا يطوِّران في هذه الأفكار إلى أن وثِقَا تمامًا في صحتها، أو على الأقل إلى أن اعتقَدَا أن غيرهما قد يسبقهما في نشر هذه الأفكار.

يثبت الكون دومًا أنه أكثر براعةً منَّا؛ فتكشف المعادلات والملاحظات عن أفكارٍ ما كان لأحد أن يتصوَّرها من قبلُ. والتساؤلات الإبداعية للعقول المتفتحة فقط هي التي ستكشف الستار عن مثل هذه الظواهر الخفية في المستقبل، وبدون أدلة غير قابلة للجدل، ما كان أي عالم ليتمكَّنَ من ابتكار ميكانيكا الكم، كما أظنُّ أنه كان من المستحيل أيضًا توقُّعُ البنية الدقيقة للحمض الريبي النووي والظواهر العديدة التي تتألَّف منها الحياة، لولا أننا واجهنا ظواهر أو معادلات أثبتَتْ لنا وجود هذه الأمور. فآلية هيجز مذهلة، كما هو حال آليات العمل الداخلية للذرة، وسلوك الجسيمات التي تمثِّل أساسَ كلِّ شيء نراه.

والبحث عملية مُتَّسِقة الأجزاء، لا نعلم بالضرورة دائمًا إلى أين نتَّجِه، لكن التجارب والنظريات تعمل كأدلة مهمة لنا في هذا الشأن. فالإعداد والمهارة، والتركيز والمثابرة، وطرح الأسئلة الصائبة، والوثوق في خيالنا مع توخِّي الحذر في الوقت نفسه، كلُّ هذه أمور تساعدنا في بحثنا عن الفهم. هذا ما يفعله العقل المتفتح أيضًا، والمناقشات مع الآخرين، والرغبة في التفوق على أقراننا أو السابقين لنا، والإيمان بوجود الإجابات. فمهما كان الدافع، وبغض النظر عن المهارات المحددة التي قد تلعب دورًا في الأمر، سيستمر العلماء في البحث داخليًّا وخارجيًّا، والتطلُّع لمعرفة الآليات المذهلة التي يعمل وفقها الكَوْن.

خاتمة

عندما اطلعتُ للمرة الأولى على تراجم التقارير الإعلامية الألمانية لبحثي في الفيزياء أو كتابي «الطرق الملتوية»،[1] أدهشني تكرار عبارة «حافة الكَوْن». وتفسير هذا الظهور المقنع ظاهريًّا — والعشوائي على ما يبدو — للعبارة لم يكن واضحًا في البداية، لكن اتضح بعد ذلك أنها ترجمة الكمبيوتر لاسمي الأخير بالألمانية.[2]

لكننا بحق على حافة الكَوْن، سواء على مستوى النطاقات الصغيرة أو الكبيرة. استكشف العلماء باستخدام التجارب مسافات تبدأ من النطاق الضعيف البالغ $١٠^{-١٧}$ سنتيمترات وصولًا إلى حجم الكون البالغ $١٠^{٣٠}$ سنتيمترات. ليس بوسعنا التيقُّن من ماهية النطاقات التي ستتغير عندها النماذج الفكرية في المستقبل، لكن الكثير من عيون المهتمين بالعلوم تركِّز حاليًّا على النطاق الضعيف الذي يستكشفه تجريبيًّا مصادم الهادرونات الكبير وأبحاث المادة المظلمة. في الوقت نفسه، يواصِل العمل النظري دراسته للنطاقات التي تتراوح ما بين النطاقات الضعيفة مرورًا بطاقات بلانك ووصولًا إلى النطاقات الأكبر، وذلك أثناء محاولتنا ملء الثغرات في فهمنا. ومن التعجرف الظنُّ أننا قد توصَّلْنا إلى كل شيء؛ فلا شك أن ثمة اكتشافات جديدة لا تزال في انتظارنا.

إن عصر العلم الحديث ليس سوى ومضة سريعة من الضوء في تاريخنا. لكن المدارك المميزة، التي تمكَّنَّا من الوصول إليها عن طريق التطورات في مجالي التكنولوجيا والرياضيات منذ نشأتهما في القرن السابع عشر، دفعتنا دفعات هائلة للأمام على طريق فهمنا للعالم من حولنا.

وقد استعرضنا في هذا الكتاب كيف يحدِّد فيزيائيو الطاقة العالية وعلماء الكونيات طريقهم في الوقت الحالي، وكيف أن الجمع بين النظرية والتجريب يمكن أن يُلقِي الضوء على بعض الأسئلة الأساسية والعميقة. فتصف نظرية الانفجار العظيم التمدُّدَ الحالي

للكَوْن، لكنها تترك بدون إجابة الأسئلة المتعلقة بما حدث قبل الانفجار، فضلًا عن الأسئلة المتعلقة بطبيعة الطاقة المظلمة والمادة المظلمة. يتنبَّأ أيضًا النموذج القياسي بالتفاعلات بين الجسيمات الأولية، لكنه يترك بدون حلٍّ الأسئلةَ المتعلقةَ بالأسباب وراء ما تتصف به هذه التفاعلات من خصائص. يمكن أن تكون المادة المظلمة وبوزون هيجز قريبين منَّا للغاية، وكذا الأدلة على التناظرات الزمكانية أو حتى الأبعاد الجديدة للفضاء، وقد يحالفنا الحظ ونتوصَّل إلى الإجابات قريبًا، أو يمكن أن يستغرق ذلك بعض الوقت في حال كانت تفاعلاتُ الكميات ذات الصلة قويةً للغاية أو ضعيفةً جدًّا، وما من سبيل أمامنا لمعرفة ذلك سوى أن نسأل ونلاحظ.

استعرضنا كذلك التوقعات بشأن بعض الأفكار الأكثر صعوبةً في اختبار صحتها، وبالرغم من أنها توسِّع نطاق الخيال، ويمكن أن ترتبط في النهاية بالواقع، فقد تبقى أيضًا في نطاق الفلسفة أو الدين. لن يدحض العلم فكرةَ الأكوان المتعددة — أو الإله في هذه الحالة — لكنه لن يثبت صحتها أيضًا على الأرجح، ومع ذلك فإن بعض جوانب فكرة الأكوان المتعددة — مثل تلك التي يمكنها تفسير التسلسل الهرمي — لها تبعات يمكن اختبار صحتها، ويرجع القرار للعلماء في دراسة ذلك أو استبعاده.

من العناصر الأخرى الرئيسية في هذا الكتاب مفاهيم على غرار النطاق، والشك، والإبداع، والاستنتاج النقدي العقلاني، وهي مفاهيم من شأنها أن تنير الطريق أمام التفكير العلمي. فيمكن أن نؤمن بأن العلم سيحقِّق تقدُّمًا في التوصُّل إلى الإجابات، وأن التعقيد قد ينشأ بمرور الوقت، حتى قبل أن نصل إلى تفسير وافٍ. قد تكون الإجابات معقَّدة، لكن ذلك لا يبرِّر التخلِّي عن الإيمان بالعقل والمنطق.

وفهم الطبيعة والحياة والكون يفرض مشكلاتٍ غاية في الصعوبة؛ فجميعنا يرغب في التوصل إلى فهم أفضل لماهيتنا، ومِن أين أتينا، وإلامَ يكون مصيرنا، والتركيز على الأمور التي تتجاوز نطاق أنفسنا والأكثر ديمومة من آخِر صيحات الموضة أو أحدث الأجهزة التكنولوجية؛ ومن هنا يسهل علينا معرفة لماذا يتجه بعض الناس إلى الدين للحصول على تفسيرات. لولا الحقائق والتفسيرات المُلهَمة التي أوضحت وجود علاقات مثيرة للدهشة، لكانت الإجابات التي توصَّل إليها العلماء إلى الآن يصعب التنبُّؤ بها للغاية. إنَّ مَن ينتهجون أسلوبَ التفكير العلمي هم مَن يطوِّرون معرفتنا بهذا العالم. ويكمن التحدي هنا في الوصول إلى أقصى درجة ممكنة من الفهم، والفضول — غير المقيَّد بالمعتقدات — هو المطلوب لتحقيق ذلك.

ولعل البعض يجدون مشكلةً في التفريق بين البحث المشروع والتعجرف، لكن في النهايةِ التفكيرُ العلمي النقدي هو السبيل الوحيد الموثوق للإجابة عن الأسئلة المتعلقة ببنية الكَوْن. وبعض العناصر المتطرفة المناهضة للتفكير في بعض الحركات الدينية المعاصرة تتناقَضُ مع التراث المسيحي التقليدي — ناهيك عن تناقُضِها مع التقدم والعلم — لكنها لحسن الحظ لا تمثِّل جميع التوجهات الدينية أو الفكرية. فتشمل أساليب التفكير كافة — حتى الدينية منها — تحديات للنماذج الفكرية الحالية، وتسمح بتطور الأفكار. وتقدُّمُنا جميعًا يستلزم استبدال الأفكار الخاطئة والبناء على الأفكار الصحيحة.

لقد أعجبتني الروح التي سادت إحدى المحاضرات التي حضرتها مؤخرًا، وألقى فيها بروس ألبرتس — الرئيس السابق للأكاديمية الوطنية للعلوم، ورئيس التحرير الحالي لمجلة «ساينس» — الضوءَ على الحاجة إلى الإبداع والعقلانية والصراحة والمرونة، وهي الصفات المتأصلة في العلم. هذا هو مزيج الخصائص القوي الذي أطلق عليه أول رئيس وزراء للهند، جواهر لال نهرو، وصفَ «الفطرة العلمية».[3] تلعب طرق التفكير العلمية دورًا محوريًّا في العالم المعاصر؛ إذ تقدِّم الأدوات الأساسية للتعامل مع الكثير من القضايا الصعبة، سواء الاجتماعية أو العملية أو السياسية؛ لذا فإنني أود أن أختم هذا الكتاب بمزيد من الأفكار حول أهمية العلم والتفكير العلمي.

إن بعض التحديات المعقدة التي نواجِهها حاليًّا يمكن التعامل معها بالجمع بين التكنولوجيا، والمعلومات المتعلقة بالمجموعات الكبيرة، والقدرة الحاسوبية العاتية، لكن الكثير من التطورات الرئيسية — سواء العلمية أو غيرها — تتطلب قدرًا كبيرًا من التفكير الذي تتولى القيام به مجموعات صغيرة أو منعزلة من الأفراد المُلهَمين الذين يعملون لفترات زمنية طويلة على حلِّ المشكلات الصعبة. ورغم أن هذا الكتاب ركَّزَ على طبيعة العلم الأساسي وقيمته، فإن البحث الخالص المدفوع بالفضول قد أدَّى — إلى جانب العلم المتقدِّم ذاته — إلى اكتشافات تكنولوجية غيَّرَتْ من أسلوب حياتنا تغييرًا كاملًا. وبالإضافة إلى منحنا أساليب مهمة للتفكير بشأن المشكلات الصعبة، يمكن أن يؤدِّي العلم الأساسي حاليًّا إلى التوصُّل إلى أدوات تكنولوجية من شأنها — عندما تجتمع مع المزيد من التفكير العلمي الذي يستوعب الإبداع والمبادئ التي تناولناها بالمناقشة — التوصُّل إلى حلول غدًا.

السؤال الذي يطرح نفسه الآن هو: كيف نتعامَل مع الأسئلة المهمة في هذا السياق؟ كيف نتجاوَز بالتكنولوجيا الأهدافَ القصيرة المدى؟ حتى في عالم التكنولوجيا، نحتاج إلى

الأفكار والدوافع معًا. فالشركة التي تصنع جهازًا تكنولوجيًّا متطوِّرًا قد تكون ناجحة للغاية، ومن السهل أن تنشغل بالسعي لصناعة جهاز آخَر، لكن ذلك قد يصرف الانتباه عن القضايا الحقيقية التي نودُّ أن تتناولها التكنولوجيا. فبالرغم من المتعة التي توفِّرها لنا أجهزة آي بود، فإن نمط الحياة القائم على استخدام هذه الأجهزة لن يحلَّ لنا المشكلات الكبيرة التي يواجهها عالمنا المعاصر.

وقد قال كيفن كيلي — أحد مؤسِّسي مجلة «وايرد» الأمريكية — عندما كنتُ برفقته في أحد المؤتمرات عن التكنولوجيا والتقدم: «إن التكنولوجيا أعظم قوة في هذا الكون.» إن كان هذا هو الحال بالفعل، فالعلم هو المسئول عن هذه القوة العظمى؛ لأن العلم الأساسي لعب دورًا محوريًّا في الثورة التكنولوجية. على سبيل المثال، لم يكن وراء اكتشاف الإلكترون دافعٌ بعيد المدى، ومع ذلك صارت الإلكترونياتُ السمةَ المميزة لعالمنا الآن. الكهرباء أيضًا كانت اكتشافًا فكريًّا خالصًا، لكن الكوكب الآن صار ينبض بالأسلاك والكابلات. حتى ميكانيكا الكم — تلك النظرية الخَفِيَّة للذرة — كانت الأداة الأساسية لعلماء مختبرات بِل في ابتكار الترانزستور، وهو الجهاز الأساسي الذي قامت عليه الثورة التكنولوجية، لكن ما كان أحد من الباحثين الأوائل للذرة ليؤمن بأن الأبحاث التي يجريها سيكون لها أي تطبيق، ناهيك عن أن يكون هذا التطبيق هو الكمبيوتر والثورة المعلوماتية. كان كلٌّ من المعرفة العلمية الأساسية والأساليب العلمية في التفكير لازمًا للتعمق في التعرُّف على طبيعة الواقع؛ ما أدَّى في النهاية إلى هذه الاكتشافات.

وما كان أي قدر من القدرة الحاسوبية أو استخدام شبكات التواصل الاجتماعي ليساعد أينشتاين في تطوير نظرية النسبية على نحو أسرع مما فعل، ولعل العلماء ما كانوا ليفهموا ميكانيكا الكم على نحو أسرع أيضًا، وهذا لا ينفي أنه عندما تكون هناك فكرة أو فهم جديد لظاهرة ما، تعجِّل التكنولوجيا من التقدم. فتتطلب بعض المشكلات الانتقال بين مجموعات كبيرة من البيانات، لكن عادةً تكون الفكرة المحورية هي الأساس. والمدارك عن طبيعة الواقع التي تمنحنا إياها ممارسةُ العلم يمكن أن تؤدِّي في النهاية إلى اكتشافات تحولية تؤثِّر فينا بطرق غير متوقعة. ومن المهم أن نواصِل سعينا وراء هذه المدارك.

صار من المتعارَف عليه الآن أن التكنولوجيا أمر محوري، وهذا صحيح لأن أغلب صور التطور الجديدة توظِّف التكنولوجيا بشكل أساسي، لكنني سأضيف هنا أنها محورية من حيث إنها ليست البداية أو النهاية، وإنما مجرد وسيلة لتنفيذ المهام

والتواصل والربط بين التطورات المختلفة. وما نرغب في استخدام التكنولوجيا فيه يرجع إلينا، كما أن المدارك المتعلِّقَة بحل المشكلات أو التطورات الجديدة يمكن أن تنشأ من العديد من صور الفكر الإبداعي.

تجعل التكنولوجيا كذلك من كلٍّ منَّا محورَ الكون الخاص بنا، وهذا ما نراه فعليًّا في تطبيق «ماب كويست» للخرائط، ومجازيًّا في أي موقع من مواقع شبكات التواصل الاجتماعي، لكن مشكلات العالم أكثر عمومية وشمولًا من ذلك. يمكن أن توفِّر التكنولوجيا الحلولَ، لكن احتمال ظهور هذه الحلول يزيد عندما تكون مدفوعةً بالتفكير المبدع والواضح، ذلك النوع من التفكير الذي نراه في أفضل الأبحاث العلمية.

إن اهتمام أمتنا، في الماضي، بالعلم والتكنولوجيا — إلى جانب إدراكها الحاجة إلى وجود التزامات طويلة المدى والتمسك بها — أثبت كونه استراتيجية ناجحة أبقتنا في طليعة الأفكار والتطورات الحديثة. لكن يبدو الآن أننا نواجِه خطرَ فقدانِ هذه القِيَم التي طالما نجحت معنا من قبلُ؛ لذا فنحن بحاجة إلى إعادة الالتزام بهذه المبادئ؛ إذ إننا نسعى ليس فقط للتطورات القصيرة المدى، وإنما أيضًا لفهم التكاليف والمزايا على المدى الطويل.

والأبحاث العقلانية للعالم تستحق مزيدًا من التقدير كي نتمكَّنَ من استخدامها في مجابهة بعض التحديات الخطيرة التي تواجهنا. أيَّدَ بروس ألبرتس كذلك في محاضرته التفكيرَ العلمي كوسيلة لتسليح الناس ضد العبارات المتشدقة، والأخبار التليفزيونية المبسطة، والأحاديث الإذاعية المفرطة في اللاموضوعية. إننا لا نرغب في ابتعاد الناس عن المنهج العلمي؛ لأن هذا المنهج ضروري للوصول إلى نتائج ذات معنى بشأن الكثير من النظم المعقَّدَة التي ينبغي للمجتمعات التعامل معها الآن، مثل: النظام المالي، والبيئة، وتقييم المخاطر، والرعاية الصحية.

لقد كان الوعي بمفهوم النطاق — وسيظل — من العناصر الأساسية لتحقيق التطور وحلِّ المشكلات، العلمية منها وغير العلمية. وتصنيف ما رُصِد وفُهِم باستخدام هذا المفهوم ساهَمَ كثيرًا في تعزيز فهمنا للفيزياء والعالم بأسره، سواء أكانت الوحدات المدروسة نطاقاتٍ ماديةً، أم مجموعاتٍ من الأفراد، أم أُطُرًا زمنيةً. وليس العلماء وحدهم هم مَن يحتاجون إلى تذكُّر هذه المفاهيم دومًا، وإنما أيضًا القادة السياسيون والاقتصاديون.

فنجد عضو المحكمة العليا في الولايات المتحدة، أنطوني كينيدي، في حديث له أمام الدائرة القضائية التاسعة، لا يشير إلى أهمية التفكير العلمي فقط، وإنما أيضًا إلى التباين المهم بين التفكير «ضيق النطاق» والتفكير «الشامل». تنطبق هاتان الكلمتان على عناصر النطاقين الصغير والكبير في الكون، مثلما تنطبق على الأساليب المفصلة والشاملة لتفكيرنا في العالم. وكما رأينا في هذا الكتاب، أحد عناصرِ التعامُل مع القضايا — سواء العلمية أو العملية أو السياسية — هو التداخُل بين هذين النطاقين للتفكير؛ فالوعي بكليهما يمثِّل أحدَ العوامل المساهمة في الأفكار الإبداعية.

أشار القاضي كينيدي، كذلك، إلى أن «الحلول السخيفة التي تثبت بعد ذلك صحتها» هي أحد الجوانب التي يحبها في العلم، وهذا بالتأكيد ما يحدث أحيانًا، لكن العلم السليم — حتى إن أدَّى إلى نتائج بعيدة المنال أو مناقضة للحدس من الناحية الظاهرية — قائمٌ على القياسات التي تثبت صحة هذه النتائج، أو على المسائل التي تستدعي حلولًا تبدو جنونيةً، لكننا نحزر أنها حلول حقيقية.

يجتمع العديد من العناصر معًا ليشكِّل أساسَ التفكير العلمي السليم. وفي هذا الكتاب حاولتُ التعبير عن أهمية التفكير العلمي العقلاني والأساس المادي الذي يقوم عليه، بالإضافة إلى الأساليب التي يختبر بها التفكير العلمي صحةَ الأفكار عن طريق التجارب، ويستبعدها عندما لا تكون ملائمةً. والتفكير العلمي يدرك أن عدم اليقين ليس فشلًا، وهو يقيِّم المخاطر كما ينبغي، ويقدِّر كلًّا من الآثار القصيرة والطويلة المدى، كما أنه يفسح المجالَ أمام التفكير الإبداعي في التوصُّل إلى حلول. كلُّ هذه أساليب من التفكير الذي يمكن أن يؤدِّي إلى التقدم، سواء داخل المختبر أو المكتب أو خارجهما. والأسلوب العلمي يساعدنا في فهم أطراف الكَوْن، لكنه يرشدنا كذلك في القرارات المهمة المتعلقة بالعالم الذي نعيش فيه الآن. إن مجتمعنا بحاجة إلى استيعاب هذه المبادئ وتعريف الأجيال المستقبلية بها.

علينا ألَّا نخاف من طرح الأسئلة المهمة، أو التفكير في المفاهيم الكبيرة. وقد أصاب أحد المعاونين لي في مجال الفيزياء، وهو ماثيو جونسون، حين قال: «لم يكن لدينا من قبلُ مثل هذه الترسانة الهائلة من الأفكار.» لكننا لا نعرف بعدُ الإجاباتِ وننتظر الاختباراتِ التجريبيةَ. أحيانًا تظهر الإجابات أسرع مما نتوقَّع، مثلما أوضح لنا إشعاعُ الخلفية الميكروني الكوني معلوماتٍ عن التمدُّد المتسارع للكَوْن. وفي بعض الأحيان، تستغرق هذه الإجابات وقتًا أطول للتوصُّل إليها، كما هو الحال في مصادم الهادرونات الكبير الذي ما زلنا ننتظر ما سيوصِّلنا إليه.

من المفترض أن نعرف المزيد قريبًا عن تكوين الكَوْن وقواه، بالإضافة إلى معرفة أسباب حمل المادة للخصائص التي تحملها، ونطمح كذلك في معرفة مزيد من المعلومات عن المادة المفقودة التي نطلق عليها وصف «المظلمة». والآن، وبعد أن وصلنا إلى نهاية هذا الكتاب، أودُّ أن أعود للجملة المقتبَسَة من أغنية فريق «بيتلز»، التي تضمنَتْها مقدمةُ كتابي السابق «الطرق الملتوية»، وهي: «إنه جميل بالتأكيد، فليس من السهل رؤيته.» فقد يكون من الصعب علينا فهم الظواهر الجديدة أو التوصُّل إليها، لكن ما لا شك فيه أن ما سنصل إليه يستحق الانتظار وخوض التحديات في سبيله.

شكر وتقدير

يتناول هذا الكتاب موضوعات شتى، وقد كنتُ محظوظةً حقًّا لمعرفتي مجموعة كبيرة من الأشخاص الذين يتمتعون بقدر مذهل من الكرم والمعرفة؛ فكان لهؤلاء الفضل في إرشادي على مدار تأليفي لهذا العمل. وعلمي بإمكانية اعتمادي على عقليات متوقدة الذكاء تطَّلِع على هذا العمل — حتى في مسوداته الأولى — كان بمنزلة الحافز القوي لي أثناء تأليفي له، وأخص بالذكر هنا أندرياس ماشل، ولوبوش موتل، وكورماك ماكارثي، الذين قرءوا جميعًا أكثر من مسودة واحدة لهذا الكتاب، وقدَّموا لي آراء قيِّمَة أثناء مراحل تطوره المختلفة. معايير كورماك المهنية العالية وصبره وإيمانه بمشروعي؛ ودقة لوبوش كفيزيائي، وحرصه على التواصل العلمي؛ وحكمة أندرياس وحماسه ودعمه المتواصل؛ كلها أمور لا يسعني تقديرها بأي ثمن.

لعبَتْ كذلك عمليات التحرير التي أجراها آخرون، وإضافاتهم، وحماسهم، دورًا غاية في الأهمية بالنسبة لي، وأذكر هنا أنَّا كريستينا بوشمان لما تتمتَّع به من بصيرة وذكاء رائعين، فضلًا عن اقتراحاتها وإسهاماتها؛ وجين ساكس ومساعدتها لي بحكمة واهتمام في لحظات الحيرة التي كانت تمر بي؛ وبولي شولمان التي أمدَّتْني بالتوجيه والتشجيع في مرحلة مبكرة من التأليف؛ وبراد فاركاس باهتمامه وأسلوبه التحريري البليغ الذي أعانني على ترسيخ فكرتي؛ هذا فضلًا عن العين الثاقبة والمهارة المذهلة للمحرِّر البريطاني، ويل سالكين، اللتين أسهمتا في تحسين بعض الفصول الرئيسية في مرحلة مهمة من الكتاب. أدين بالعرفان، أيضًا، لبوب كان، وكيفن هيرفيج، وديلاني كاهوالا، وديفيد كرون، وجيم ستون، لعملهم على تدقيق وتصحيح طبعات الكتاب، وما قدَّموه من اقتراحات بعد قراءتهم للمسودة شبه النهائية.

أما فيما يتعلَّق بمساعدتي في الحصول على التفاصيل الصحيحة لمصادم الهادرونات الكبير وتجربتَيْ أطلس واللولب المركب للميوونات، فأدين بجزيل الشكر لعالِمَي الفيزياء تيتسيانو كامبوريسي وفابيولا جيانوتي اللذين يتمتعان بأقصى قدر من المعرفة التي يمكن أن يصل إليها أي إنسان بشأن هذين الكاشفين. وما من أحدٍ بالطبع كان ليمنحني رأيًا أفضل فيما كتبته عن مصادم الهادرونات الكبير وتاريخه من لين إيفانز. أود أيضًا أن أتقدَّم بالشكر لكلِّ مَن تفضَّلوا بالتعليق على بعض الأقسام المتعلقة بالفيزياء في الكتاب، وهم: دوج فينكباينر، وهاوي هابر، وجون هوت، وتوم إيمبو، وآمي كاتس، وماثيو كليبان، وألبيون لورانس، وجو ليكن، وجون ماسون، وريني أونج، وبراين شوف، وروبرت ويلسون، وفابيو زويرنر. وأشكر أيضًا الطلَّاب المستجدين بالحلقات الدراسية بجامعة هارفرد لما منحوه لي من آراء حول فهمهم لمصادم الهادرونات الكبير.

كانت العلاقة بين الدين والعلم مجالًا جديدًا لم أخضه من قبلُ، وقد ساعدني في تناول هذا الموضوع بثقة أكبر ما حصلت عليه من نصائح ومعارف من أوين جينجريتش، وليندا جريجسون، وسام هاسلبي، وديف ثوم. أدين بالعرفان أيضًا لكلِّ مَن ساعدني في مجال تاريخ العلوم، من أمثال آن بلير، وصوفيا تالاس، وتوم ليفنسون، الذين أضفوا الدقة على موضوعي.

من جانب آخَر، مثَّلَتْ بعض الموضوعات، مثل المخاطر وعدم اليقين، أمورًا شائكة (وملتبسة)، لكنني تمكَّنْتُ من تناولها بفضل نواه فيلدمان، وجو فراجولا، وفيكتوريا جراي، وجو كرول، وكيرت ماك مولين، وجامي روبينز، وجيني ساك، الذين حضروا جميعًا ندوةَ كلية الحقوق بجامعة هارفرد، وأخص بالذكر جوناثان وينير لمشاركته خبراته معي، وكذلك المحادثات السابقة مع كاس سنستاين. الإبداع أيضًا يمكن أن يكون من الموضوعات الشائكة؛ لذا فأنا أدين بالعرفان في هذا الموضوع لكلٍّ من كارين بارباروسا، وبول جراهام، وليا هالوران، وجاري لودر، وليز ليرمان، وبيتر ميس، وإليزابيث ستريب، لإطْلاعي على ما لديهم من أفكارٍ ورؤًى. وأود أن أتوجَّهَ بشكر خاص لسكوت دريكسون لمحادثاته معي التي مثَّلَتِ المدخل للفصل الأول من هذا الكتاب، ولتصحيحه لي عندما كانت تخونني الذاكرة. والشكر واجب أيضًا لمنظِّمي مؤتمر «تيكونومي» لعام ٢٠١٠ لدعوتهم لي للانضمام لهيئة الخبراء الافتتاحية، والتي ساهَمَ الإعداد لها في النتائج المذكورة في هذا الكتاب. أشكر أيضًا كلَّ مَن ذكرت محادثاتي معهم على مدار الكتاب، كما أشكر ألفريد أسين، ورودني بروكس، وديفيد فينتون، وكيفن ماك

جرافي، وسيشا براتاب، ودانا راندل، وآندي سينجلتون، وكيفن سلافين، لعطائهم من الأفكار والآراء التي غمروني بها، ولآمي هومز وريك كوت لنصحهما وتشجيعيهما لي.

إنني أدين بالفضل لكثير من الأفراد لمساهمتهم مساهمةً عظيمة في تشجيعي منذ بداية تفكيري في خوض تحدِّي تأليف هذا الكتاب. فالشكر لجون بروكمان ودانيال هالفرين بدار نشر «إيكو» اللذين كانا لهما الفضل في بدئي لهذا المشروع؛ ومات وايلاند، ومساعِدته شانا ميلكي، لمساعدتي في ربط الأجزاء بعضها ببعض. كما أنني أشكر أيضًا العاملين في دار «إيكو» لما بذلوه من جهد لإخراج هذا الكتاب إلى النور، وآندرو وايلي لرعايته لي في المراحل الأخيرة منه. أسعدني أيضًا العمل مع فريق الرسوم الإيضاحية: تومي ماكال، وآنا بيكر، وريتشرت شنور، الذين عبَّروا بنجاح عن الأفكار المعقدة التي يتناولها الكتاب بصور واضحة ودقيقة.

وأخيرًا، أشكر مَن تعاونوا معي في الأبحاث وزملائي من الفيزيائيين لكلِّ ما علَّموني إياه. وأخص بالذكر أيضًا أسرتي لتشجيعها لي في عشقي للعقلانية. وأشكر أصدقائي لصبرهم ودعمهم لي، وأيضًا كلَّ مَن أعانوني على تشكيل أفكاري على مدار حياتي، سواء أكنتُ ذكرتُهم هنا أم لم أذكرهم.

ملاحظات

مقدمة

(1) I will often approximate this as 27 kilometers.

(2) The Large Hadron Collider is quite big, but it is used to study infinitesimal distances. The reasons for its large size are described later on when we discuss the LHC in detail.

(3) Unlike in the movie, Herman Hupfield’s famous song “As Time Goes By” written in 1931 began with an unmistakable reference to people’s familiarity with the latest physics developments:

This day and age we’re living in
Gives cause for apprehension,
With speed and new invention,
And things like fourth dimension,
Yet we get a little weary
From Mr. Einstein’s theory

الفصل الأول: الضئيل في نظرك ضخم في نظري

(1) Fielding, Henry. *Tom Jones.* (Oxford: Oxford World Classics, 1986).

(2) Quantum mechanics can have macroscopic effects in carefully prepared systems or when measurements apply to high statistics situations, or very precise devices so that small effects can emerge. However, that does not invalidate using an approximate classical theory for most ordinary phenomena. It depends on precision as Chapter 12 will further address. The effective theory approach allows for the approximation and makes precise when it is inadequate.

(3) I will sometimes employ exponential notation, which I will use here to explain what I mean in the middle in terms of powers of ten. The size of the universe is 10^{27} meters. This number is a one followed by 27 zeroes, or one thousand trillion trillion. The smallest imaginable scale is 10^{-35} meters. This number is a decimal point followed by thirty-four zeroes followed by a one, or one hundredth of one billionth of one trillionth of one trillionth. (You can see why exponential notation is easier.) Our size is about 10^1. The exponent here is 1, which is reasonably close to the middle between 27 and −35.

الفصل الثاني: كشف الأسرار

(1) Levenson, Tom. *Measure for Measure: A Musical History of Science* (Simon & Schuster, 1994).

(2) During the Inquisition, the Romans didn't include Tycho's books in their Index, as would have been expected based on his Lutheran faith, because they wanted his framework to keep the Earth stationary yet consistent with Galileo's observations.

(3) Hooke, Robert. *An Attempt to Prove the Motion of the Earth from Observations* (1674), quoted in Owen Gingerich, *Truth in Science: Proof,*

Persuasion, and the Galileo Affair, Perspectives on Science and Christian Faith, vol. 55.

الفصل الثالث: العيش في عالم مادي

(1) Rilke, Rainer Maria. *Duino Elegies* (1922).

(2) Doyle, Arthur Conan. *The Sign of the Four* (originally published in 1890 in Lippincott's Monthly Magazine, chapter 1), in which Sherlock Holmes comments on Watson's pamphlet, "A Study in Scarlet."

(3) Browne, Sir Thomas. *Religio Medici* (1643, pt. 1, section 9).

(4) Augustine. *The Literal Meaning of Genesis,* vol. 1, books 1–6, trans. and ed. by John Hammond Taylor, S. J. (New York: Newman Press, 1982). Book 1, chapter 19, 38, pp. 42-43.

(5) Augustine. *On Christian Doctrine,* trans. by D. W. Robertson (Basingstoke: Macmillan, 1958).

(6) Augustine. *Confessions,* trans. by R. S. Pine-Coffin (Harmondsworth: Penguin, 1961).

(7) Stillman, Drake. *Discoveries and Opinions of Galileo* (Doubleday Anchor Books, 1957) p. 181.

(8) Ibid., pp. 179-180.

(9) Ibid., p. 186.

(10) Galileo, 1632. *Science & Religion: Opposing Viewpoints,* ed. Janelle Rohr (Greenhaven Press, 1988), p. 21.

(11) See, for example, Gopnik, Alison. *The Philosophical Baby* (Picador, 2010).

الفصل الرابع: البحث عن أجوبة

(1) Matthew 7:7–8.

(2) Blackwell, Richard J. *Galileo, Bellarmine, and the Bible* (University of Notre Dame Press, 1991).

(3) Quoted in Gerald Holton, "Johannes Kepler's Universe: Its Physics and Metaphysics," *American Journal of Physics* 24 (May 1956): 340–351.

(4) Calvin, John. *Institutes of Christian Religion,* trans. by F. L. Battles in *A Reformation Reader,* Denis R. Janz, ed. (Minneapolis: Fortress Press, 1999).

الفصل الخامس: الرحلة الغامضة الساحرة

(1) For example, in ancient Greece, stadia didn't have a fixed length since they were based on different body part lengths in different regions and in different times.

(2) There is, of course, an electromagnetic field, but there is virtually no actual matter.

(3) Momentum is a quantity that is approximated by the product of mass and velocity at small speeds but is equal to the energy divided by the speed of light for objects moving at relativistic velocities.

(4) Gamow, George. *One, Two, Three … Infinity: Facts and Speculations of Science* (Viking Adult, September 1947).

(5) Note that this figure corresponds to a more precise version of unification than was true for the original Georgi–Glashow theory, in which the lines almost converged, but didn't quite meet. This imperfect unification was demonstrated only later on, with better measurements of the forces' interaction strengths.

(6) Although it comes close, we now know that unification won't occur within the Standard Model. However, unification can happen in modifications of the Standard Model, such as the supersymmetric models considered in Chapter 17.

الفصل السادس: الإيمان بما «نراه»

(1) Feynman, Richard. The QED Lecture at University of Auckland (New Zealand, 1979). See also: *Richard Feynman Lectures, Proving the Obviously Untrue.*

(2) Quoted, for example, in Richard Rhodes, *The Making of the Atomic Bomb* (Simon & Schuster, 1986).

(3) Particle physicists measure energy in units of electronvolts and those are the units I will use throughout. An electronvolt (eV) is the energy acquired by a free electron when accelerated through an electric potential difference of one volt. More commonly, I will refer to the units GeV, which is a billion electron-volts, and a TeV, which is a trillion electronvolts.

(4) Ironically, the plot of Dan Brown's *Angels and Demons* centers on antimatter, whereas the LHC is the first CERN collider for which the initial states are purely matter.

الفصل السابع: حافة الكَوْن

(1) Overbye, Dennis. "Collider Sets Record and Europe Takes U. S. Lead." *New York Times,* December 9, 2009.

(2) In 1997, the European Physical Society recognized Robert Brout, François Englert, and Peter Higgs for their achievement, and the three were once again awarded in 2004 with the Wolf Prize in Physics. François Englert, Robert Brout, Peter Higgs, Gerald Guralnik, C. R. Hagen, and Tom Kibble all received the J. J. Sakurai Prize for Theoretical Particle Physics

from the American Physical Society in 2010. I will refer only to Higgs and Peter Higgs throughout the text, as my focus is the physical mechanism and not the personalities. Of course if the Higgs is discovered, only three at most will receive a Nobel Prize and priority issues will be important. For an overview of the situation, see, for example, Luis Álvarez-Gaumé and John Ellis, "Eyes on a Prize Particle," *Nature Physics* 7 (January 2011).

(3) It is ambiguous whether the Standard Model should also include the very heavy right-handed neutrinos that are likely to exist and play a role in neutrino masses.

الفصل الثامن: الحلقة الحاكمة

(1) Its original purpose was to accelerate protons and antiprotons, but currently only protons, in its current use as the SPS accelerator at the LHC.

الفصل العاشر: ثقوب سوداء تبتلع العالم

(1) *Physical Review D,* 035009 (2008).

(2) http://lsag.web.cern.ch/lsag/LSAG-Report.pdf.

الفصل الحادي عشر: عمل محفوف بالمخاطر

(1) See, for example, Taibbi, Matt. "The Big Takeover: How Wall Street Insiders are Using the Bailout to Stage a Revolution," *Rolling Stone,* March 2009.

(2) This point is also addressed, for example, in J. D. Graham and J. B. Wiener, *Risk vs. Risk: Tradeoffs in Protecting Health and Environment* (Harvard University Press, 1995), especially Chapter 11.

(3) See also, for example, Slovic, Paul. "Perception of Risk," *Science* 236, 280–285, no. 4799 (1987). Tversky, Amos, and Daniel Kahneman,

"Availability: A heuristic for judging frequency and probability," *Cognitive Psychology* 5 (1973): 207–232. Sunstein, Cass R., and Timur Kuran. "Availability Cascades and Risk Regulation," *Stanford Law Review* 51 (1999): 683–768. Slovic, Paul "If I Look at the Mass I Will Never Act: Psychic Numbing and Genocide," *Judgment and Decision Making* 2, no. 2 (2007): 79–95.

(4) See also, for example, Kousky, Carolyn, and Roger Cooke. *The Unholy Trinity: Fat Tails, Tail Dependence, and Micro-Correlations,* RFF Discussion Paper 09–36–REV (November 2009). Kunreuther, Howard, and M. Useem. *Learning from Catastrophes: Strategies for Reaction and Response* (Upper Saddle River, NJ: Wharton School Publishing). Kunreuther, Howard. *Reflections and Guiding Principles for Dealing with Societal Risks,* in *The Irrational Economist: Overcoming Irrational Decisions in a Dangerous World,* E. Michel-Kerjan and P. Slovic, eds., New York Public Affairs Books 2010. Weitzman, Martin L., *On Modeling and Interpreting the Economics of Catastrophic Climate Change,* Review of Economics and Statistics, 2009.

(5) See, for example, Joe Nocera's cover story on "Risk Mismanagement" in the *New York Times Sunday Magazine,* January 4, 2009.

(6) The problem of irreversibility has been addressed by some economists, including Arrow, Kenneth J., and Anthony C. Fisher, "Environmental Preservation, Uncertainty, and Irreversibility," *Quarterly Journal of Economics,* 88 (1974): 312–319. Gollier, Christian, and Nicolas Treich, "Decision Making under Uncertainty: The Economics of the Precautionary Principle," *Journal of Risk and Uncertainty* 27 no. 7 (2003). Wiener, Jonathan B. "Global Environmental Regulation," *Yale Law Journal* 108 (1999): 677–800.

(7) E.g., Richard Posner, *Catastrophe: Risk and Response* (Oxford University Press 2004).

(8) Leonhardt, David. “The Fed Missed This Bubble: Will It See a New One?” *New York Times,* January 5, 2010.

الفصل الثاني عشر: القياس والشك

(1) In this book, I use the term “systematic uncertainty,” rather than the more commonly used term “systematic error.” Errors are often associated with mistakes, whereas uncertainty refers to the inevitable level of imprecision, given your apparatus.

(2) Again, people commonly use the term statistical error to refer to an uncertain measurement due to finite statistics.

(3) Kristof, Nicholas. “New Alarm Bells About Chemicals and Cancer,” *New York Times,* May 6, 2010.

الفصل الثالث عشر: تجربتا اللولب المركب للميوونات وكاشف أطلس

(1) This quote has also been attributed to Robert Storm Peterson and Niels Bohr.

الفصل الرابع عشر: التعرُّف على الجسيمات

(1) This table includes separate entries for left- and right-handed particles. These particles are distinguished by their chirality, which for massless particles tells the spin along the direction of motion. Masses mix the two—such as a left- and right-handed electron. The precise distinguishing feature is less important for this table than the difference in their interactions. If all particles were massless, the weak force that changed up-type into down-type quarks and charged into neutral leptons would act only on left-handed particles. The strong and electromagnetic forces, on the other hand, act on both, with only the quarks charged under the strong force.

(2) The three types of neutrinos get paired via the weak force with the three charged leptons. However, once they are produced, neutrinos can oscillate into each other, no longer remaining identified solely by the charged lepton with which they are paired. The neutrinos will sometimes be labeled simply with numbers to refer to their relative mass and sometimes with labels referring to the charged lepton according to the context.

(3) If the initial *b* meson is neutral, you instead see a track that originates from the decay point, with no precursor track from the neutral initial state.

(4) The interaction among the *W*, the top quark, and the bottom quark is however the reason the top can decay into a bottom and a *W*.

(5) One can also define a relativistic mass that depends on momentum and energy, but the implication is the same.

(6) Notice that this spread distinguishes bosons and fermions, classes of particles distinguished by quantum mechanics. Force carriers and the hypothetical Higgs particles are bosons. All other Standard Model particles are fermions.

الفصل الخامس عشر: الحقيقة والجمال ومفاهيم علمية خاطئة أخرى

(1) Quoted in Stewart, Ian. *Why Beauty Is Truth* (Basic Books, 2007).

الفصل السادس عشر: بوزون هيجز

(1) On WNYC's *The Takeaway*, March 31, 2007.

(2) Sometimes people also debate whether right-handed neutrinos belong in the Standard Model. Even if present, they are likely to be extremely heavy and not very important for lower-energy processes.

الفصل السابع عشر: أفضل النماذج المحتملة

(1) http://xxx.lanl.gov/PS_cache/arxiv/pdf/l101/1101.1628vl.pdf.

(2) This is discussed in much greater detail in *Warped Passages*.

(3) Again, this is discussed at length in *Warped Passages*. The original paper is Lisa Randall and Raman Sundrum, *Physical Review Letters* 83 (1999): 4690–4693.

(4) Arkani-Hamed, Nima, Savas Dimopoulos, Gia Dvali, *Physics Letters* B429 (1998): 263–272; Arkani-Hamed, Nima Savas Dimopoulos, Gia Dvali, *Physical Review* D59: 086004, 1999.

(5) Randall, Lisa, and Raman Sundrum, *Physical Review Letters* 83 (1999): 3370–3373.

الفصل التاسع عشر: رحلة نحو الخارج

(1) Original short film *Powers of Ten* by Ray Eames and Charles Eames, 1968; *Powers of Ten: A Flip Book* by Charles and Ray Eames (W. H. Freeman Publishers, 1998); also Philip Morrison and Phylis Morrison and the office of Charles and Ray Eames, *Powers of Ten: About the Relative Sizes of Things in the Universe* (W. H. Freeman Publishers, 1982).

الفصل العشرون: الضخم في نظرك ضئيل في نظري

(1) See e.g., Alan Guth's *The Inflationary Universe* (Perseus Books, 1997) for a more extensive discussion of this point.

الفصل الحادي والعشرون: زوَّار من الجانب المظلم

(1) Some dark matter particles are their own antiparticles, in which case they need to find other similar particles.

الفصل الثاني والعشرون: التفكير عالميًّا والعمل محليًّا

(1) Dr. Mihaly Csikszentmihalyi pioneered the concept of flow to describe this phenomenon in his book *Flow: The Psychology of Optimal Experience* (Random House, 2002).

(2) Brooks, David. “Genius: The Modern View,” *New York Times*, April 30, 2009.

(3) Gladwell, Malcolm. *Outliers: The Story of Success* (Little Brown & Co., 2008).

(4) Gell–Mann, Murray. *The Quark and the Jaguar: Adventures in the Simple and the Complex* (W.H. Freeman & Company, 1994).

(5) *Teacher’s Edition of Current Science* 49, no. 14 (January 6–10, 1964).

خاتمة

(1) *Verborgene Universen* in German.

(2) In German, “rand” means “edge” and “all” means “universe.”

(3) See, too, for example, Susan Jacoby, *The Age of American Unreason* (Pantheon, 2008).